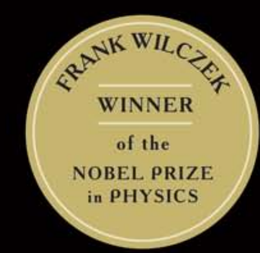
ФРЭНК ВИЛЬЧЕК



ТОНКАЯ ФИЗИКА

МАССА, ЭФИР И ОБЪЕДИНЕНИЕ ВСЕМИРНЫХ СИЛ



Автор — лауреат Нобелевской премии по физике за 2004 год. В этой книге впервые изложена суть Главной Теории, которая описывает реальность полнее и адекватнее, чем знаменитая Стандартная Модель физики частиц

THE LIGHTNESS OF BEING

Mass, Ether, and the Unification of Forces

Frank Wilczek



A Member of the Perseus Books Group
New York

ФРЭНК ВИЛЬЧЕК

ТОНКАЯ ФИЗИКА

МАССА, ЭФИР И ОБЪЕДИНЕНИЕ ВСЕМИРНЫХ СИЛ



Санкт-Петербург • Москва • Екатеринбург • Воронеж
Нижний Новгород • Ростов-на-Дону
Самара • Минск

2018

ББК 22.3
УДК 53
В46

Вильчек Ф.

В46 Тонкая физика. Масса, эфир и объединение всемирных сил. — СПб.: Питер, 2018. — 336 с.: ил. — (Серия «New Science»).

ISBN 978-5-496-02934-6

Перед вами — уникальная книга, исследующая подоплеку новейших физических идей о массе, энергии и природе вакуума. Автор, лауреат Нобелевской премии по физике, излагает современные взгляды на нашу невероятную Вселенную и прогнозирует новый золотой век фундаментальной физической науки. Великолепный рассказ о единстве материи и энергии, об элементарных частицах и их взаимодействиях — в этом шедевре серьезной научно-популярной литературы.

16+ (В соответствии с Федеральным законом от 29 декабря 2010 г. № 436-ФЗ.)

ББК 22.3
УДК 53

ISBN 978-0465018956 англ.
ISBN 978-5-496-02934-6

Оглавление

Посвящается памяти
Сэма Треймана и Сидни Коулман.
Гидов в науке, друзей по жизни.

Руководство для читателя

Книга, которую вы держите в руках, имеет очень простую структуру: ее следует читать просто главу за главой, от начала и до конца.

Вместе с тем я включил в нее:

- обширный глоссарий, необходимый для того, чтобы вас не сбивали с толку незнакомые слова и чтобы вам не приходилось возвращаться к тому месту, где они встречаются впервые. Там есть даже несколько шуток;
- сноски, которые уточняют некоторые моменты, развивают важные идеи или содержат ссылки на источники;
- три приложения. Первые два посвящены более глубокому раскрытию тем, обсуждаемых в главах 3 и 8 соответственно; третье представляет собой отчет от первого лица о том, как было сделано ключевое открытие, описанное в главе 20.

Кроме того, предлагаю посетить интернет-страницу itsfrombits.com, где вы найдете дополнительные изображения, ссылки и новости, относящиеся к данной книге.

Вы можете обращаться к приложениям по мере изучения соответствующих глав, однако, если вы предпочтете этого не делать, материал книги все равно должен быть вам понятен. Я рассчитывал немного разгрузить главу 8, но в конце концов не смог этого сделать. В связи с чем в данной главе вы найдете *очень много* шума из Ничего.

Часть I

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МАССЫ

Материя — не то, чем она кажется. Ее самое очевидное свойство, называемое сопротивлением движению, инерцией или массой, может быть более глубоко раскрыто в совершенно других терминах. Масса материи — это энергия, заключенная в фундаментальных строительных блоках, которые сами по себе массой не обладают. Пространство тоже является не тем, чем оно кажется. То, что видится пустым местом, предстает перед нашими умами в виде сложной среды, наполненной случайными проявлениями разных процессов.

Глава 1. За дело

Вселенная — не то, чем она была раньше, и не то, чем она кажется.

Зачем все *это*? Люди, размышляя об огромном мире вокруг себя, о разнообразном и часто удивительном жизненном опыте и перспективе смерти, вынуждены задавать себе этот вопрос. Мы ищем ответы во многих источниках: в древних текстах и сохранившихся традициях, в любви и мудрости других людей, в музыкальных творениях и произведениях искусства. Каждый из этих источников может предложить что-то свое.

Однако логичным первым шагом при поиске ответов было бы понять, что подразумевается под «этим». Наш мир может рассказать о себе множество важных и удивительных вещей. Именно им и посвящена эта книга. Я хочу обогатить ваше понимание «того», в чем мы с вами находимся.

Чувства и картина мира

Начнем с того, что мы строим наши картины мира из странного исходного материала: мы используем сигналообрабатывающие инструменты, «спроектированные» эволюцией для отбора из

наполненной информацией Вселенной очень немногих входящих потоков данных.

Потоки данных? Они более знакомы нам как зрение, слух, обоняние и т. д. В современном понимании зрение представляет собой отбор проб электромагнитного излучения, проходящего через небольшое отверстие в наших глазах, при этом из широчайшего спектра отбирается весьма ограниченная радуга цветов. Слух отслеживает изменение давления воздуха на наши барабанные перепонки, а обоняние производит тонкий химический анализ воздуха, попадающего в наши носовые пазухи. Другие сенсорные системы предоставляют приблизительную информацию об ускорении, с которым движется все наше тело (кинестетическое ощущение), о температуре и давлении на его поверхности (осязание), дают некоторое представление о химическом составе вещества на нашем языке (вкус) и еще немного всякой всячины.

Эти сенсорные системы позволяли нашим предкам, как позволяют и нам, построить богатую динамическую картину мира, помогающую адекватно реагировать на происходящее. Наиболее важными ее компонентами являются более или менее стабильные объекты (например, другие люди, животные, растения, камни, солнце, звезды, облака), одни из них движутся, другие представляют опасность, третьи годятся в пищу, а четвертые, избранные и особенно интересные, являются желанными партнерами.

Устройства для усиления наших органов чувств открывают перед нами более богатый мир. Когда Антони ван Левенгук в 1670-х годах рассмотрел живой мир через первые качественные микроскопы, он увидел совершенно неожиданный скрытый порядок бытия. За короткое время он обнаружил бактерии, сперматозоиды и по-

лосатую структуру мышечных волокон. Сегодня мы относим многие болезни (и полезные эффекты) на счет бактерий. Основа наследственности (по крайней мере половина) находится в крошечном сперматозоиде. А наша способность двигаться обеспечивается этими полосами волокон. Точно так же, когда Галилео Галилей в 1610-х годах впервые направил телескоп в небо, обнаружились новые богатства: он увидел пятна на Солнце, горы на Луне, спутники вокруг Юпитера и множество звезд Млечного Пути.

Однако самым главным усиливающим органы чувств устройством является мыслящий разум. Он позволяет нам осознать, что мир содержит гораздо больше и во многих отношениях представляет собой не то, чем кажется на первый взгляд. Многие ключевые факты о мире не фиксируются нашими чувствами. Смена сезонов, сопровождаемая неизменным годовым циклом восхода и захода солнца, ночное вращение звезд на небе, более сложные, но все же предсказуемые движения Луны и планет, а также их связь с затмениями — все эти закономерности не улавливаются глазом, ухом или носом. Однако мыслящий разум может их разгадать. А заметив эти закономерности, разум вскоре обнаруживает, что они являются *более* регулярными, чем эмпирические правила, которыми мы пользуемся для составления повседневных планов и предположений. Более глубокие, скрытые закономерности поддаются подсчету и геометрии — одним словом, математической науке.

Другие скрытые закономерности были выявлены благодаря технологиям и, что примечательно, искусству. Красивым и исторически важным примером является устройство струнных музыкальных инструментов. Около 600 года до н. э. Пифагор заметил, что тона лиры звучат наиболее гармонично, когда длины струн

соотносятся между собой как простые целые числа. Вдохновившись этой догадкой, Пифагор и его последователи сделали замечательное интуитивное открытие. Они предположили возможность построения другой картины мира, менее зависимой от наших чувств, но лучше соответствующей скрытой гармонии природы, а значит — и реальности. В этом и заключается смысл научного кредо пифагорейского союза: «Все вещи суть числа».

Научная революция XVII века начала подтверждать догадки древних греков. Она привела к открытию Исааком Ньютоном математических законов движения и тяготения. Законы Ньютона позволили точно рассчитывать движения планет и комет, а при наличии мощных инструментов — описывать и движение материи в целом.

Тем не менее ньютоновские законы действуют в картине мира, которая очень отличается от повседневных интуитивных представлений. Поскольку ньютоновское пространство бесконечно и однородно, Земля и ее поверхность не являются каким-то особенным местом. Направления «вверх», «вниз» и «в сторону» принципиально похожи. Все остальное тоже не получает каких-либо преимуществ перед равномерным движением. Ни одно из этих понятий не вписывается достаточно хорошо в повседневный опыт. Это беспокоило современников Ньютона и даже его самого. (Ньютона тревожила относительность движения, несмотря на то что она является логическим следствием его уравнений. Чтобы избавиться от нее, он постулировал существование «абсолютного» пространства, относительно которого определены истинный покой и движение.)

Еще один прорыв был совершен в XIX веке, когда Джеймс Клерк Максвелл вывел уравнения, описывающие электричество и магнетизм. Эти новые уравнения охватывали более широкий круг

явлений, включая ранее известные и вновь открытые виды света (например, то, что мы теперь называем ультрафиолетовым излучением и радиоволнами), в рамках математически точной картины мира. Такой прорыв требовал пересмотра и значительного расширения нашего восприятия реальности. Там, где Ньютон описал движение частиц под действием силы тяжести, уравнения Максвелла заполнили пространство игрой «полей», или «эфиров». По словам Максвелла, то, что наши органы чувств воспринимают как пустое пространство, на самом деле является домом для невидимых электрических и магнитных полей, которые оказывают воздействие на видимую нам материю. Несмотря на то что эти поля начинаются как математический прием, они «выскакивают» из уравнений, чтобы жить собственной жизнью. Изменение электрических полей производит магнитные поля, изменение магнитных полей создает электрические поля. Таким образом, эти поля могут оживлять друг друга по очереди, порождая самовоспроизводящиеся возмущения, которые движутся со скоростью света. Благодаря уравнениям Максвелла мы понимаем, что эти возмущения и *есть* свет.

Открытия Ньютона, Максвелла и многих других блестящих ученых значительно расширили человеческое воображение. Однако только в XX и XXI веках развитие физики позволило поистине приблизить осуществление мечты Пифагора. По мере того как наше описание фундаментальных процессов становится все более полным, мы начинаем воспринимать больше и видеть иначе. Глубинная структура мира довольно сильно отличается от его поверхностной структуры. Чувства, с которыми мы рождаемся, не соответствуют нашим наиболее полным и точным моделям мира. Я предлагаю вам расширить восприятие реальности.

Сила, смысл и метод

Когда я был маленьким, мне нравилось думать, что за видимостью вещей скрываются великие силы и тайные смыслы*. Я был очарован магическими представлениями и хотел стать волшебником. Однако мой первый набор волшебника стал для меня полнейшим разочарованием. Я понял, что секреты волшебства основаны на хитрых уловках.

Позднее меня очаровывала религия, особенно римско-католическая вера, в атмосфере которой я рос. Мне рассказали о секретных смыслах, стоящих за видимыми вещами, о великих силах, на которые можно повлиять молитвой и ритуалами. Однако по мере изучения науки некоторые понятия и объяснения в древних священных текстах начали казаться мне явно неправильными; а по мере изучения истории и историографии (исследований в области истории) я усомнился в некоторых описанных в тех текстах событиях и фактах.

Однако наибольшим разочарованием явилось не то, что в священных текстах были ошибки, а то, что они не выдерживали сопоставления с наукой. По сравнению с тем, что я узнавал, изучая научные дисциплины, они предлагали очень мало по-настоящему удивительных и впечатляющих идей. Разве те представления могли бы соперничать с понятием бесконечного пространства, далеких звезд, сопоставимых с нашим Солнцем и даже превосходящих его? Скрытых сил и новых, невидимых форм «света»? Или огромных энергий, которые люди могли, понимая *естественные* процессы, научиться освобождать и контролировать? Я начал думать, что если Бог существует, то Он (или Она, или Они, или Оно) проделал намного более впечатляющую

* И мне по-прежнему нравится эта идея! — *Примеч. авт.*

работу по раскрытию Себя в мире, чем описывается в старых книгах; и что сила веры и молитвы неуловима и ненадежна по сравнению с повседневными чудесами, которые творят медицина и технологии.

«Ах, — слышу я возражение приверженца традиционной веры, — но ведь научное исследование мира не раскрывает его *смысла*».

На это я отвечаю: дайте ему шанс. Наука выявляет некоторые очень удивительные факты о том, что собой представляет мир. Прежде чем пытаться постичь его смысл, необходимо понять, чем этот мир является.

Во времена Галилея преподаватели философии и богословия — эти предметы были неразделимы — вели грандиозные беседы о природе действительности, структуре вселенной и способах устройства мира, основываясь на сложных метафизических аргументах. Тем временем Галилей измерял скорость скатывания шариков с наклонных плоскостей. Как приземленно! Тем не менее философские беседы, какими бы грандиозными они ни были, отличались неопределенностью. Исследования Галилея были четкими и точными. Старая метафизика не прогрессировала, в то время как работа Галилея привела к богатым и захватывающим результатам. Галилея тоже волновали великие вопросы, однако он понимал, что для получения подлинных ответов требуются терпение и смирение перед фактами.

Этот урок справедлив и сегодня. Лучший способ решения самых важных вопросов, вероятно, заключается в диалоге с Природой. Мы должны задавать уточняющие вопросы, позволяющие Природе давать нам значимые ответы, в особенности такие, которые могли бы нас удивить.

Применение этого подхода неестественно для нас. В условиях, в которых мы эволюционировали, важные решения должны

были приниматься быстро и с использованием доступной информации. Людям нужно было забить копьем свою добычу, прежде чем они сами станут добычей того, на кого охотились. Они не могли останавливаться для изучения законов движения и аэродинамики копий и вычисления траектории. И большие сюрпризы ими определенно *не* приветствовались. Мы хорошо приспособлены к усвоению и использованию эмпирических правил, а не к выявлению абсолютных причин и тонких различий. Еще меньше мы приспособлены к выполнению длинных цепочек вычислений, которые соединяют фундаментальные законы с наблюдаемыми следствиями. С этим намного лучше справляются компьютеры!

Чтобы получить как можно больше от нашего диалога с Природой, мы должны согласиться на использование Ее языка. Способы мышления, которые позволяли выживать и размножаться в африканской саванне 200 000 лет назад, уже нектуальны. Я предлагаю вам расширить свой способ мышления.

Масса — центральное понятие

В этой книге мы исследуем некоторые из самых великих вопросов, которые только можно вообразить: о фундаментальной структуре физической реальности, о природе пространства, о содержимом Вселенной и о будущем человеческих исследований. Вдохновленный примером Галилея, я буду обращаться к этим вопросам по мере их возникновения в процессе естественного диалога с Природой, когда мы будем подходить к конкретной теме.

Путь к самым серьезным вопросам нам позволит проложить тема *массы*. Для глубокого ее понимания мы пойдем дальше Ньютона, Максвелла и Эйнштейна, обратившись к множеству новейших и самых странных идей из мира физики. И мы увидим, что

понимание массы позволяет нам подойти к решению фундаментальных проблем объединения сил и гравитации, которые находятся на передовой текущих исследований современной науки.

Чем объясняется центральная роль массы? Позвольте мне рассказать вам одну историю.

Когда-то давно существовало то, что называлось материей, и она была вещественной, тяжелой и неизменной. А то, что очень отличалось от нее, называлось светом. Люди воспринимали их в качестве отдельных потоков данных, осязая одно и наблюдая другое. Материя и свет служили — и все еще служат — мощными метафорами для других противопоставляемых аспектов реальности: плоти и духа, существования и становления, земного и небесного.

Когда материя появлялась из ниоткуда, это воспринималось как чудо, как тогда, когда Иисус накормил множество людей пятью хлебами.

Научной душой материи, ее неприводимой сущностью являлась масса. Масса определяла сопротивление материи движению, ее инерцию. Масса была неизменной, «сохраняемой». Она могла передаваться от одного тела другому, но никогда не могла возникнуть или исчезнуть. Для Ньютона масса *определяла* количество материи. В физике Ньютона масса обеспечивала связь между силой и движением, а также служила источником силы тяжести. Для Лавуазье постоянство массы, ее точное сохранение, составляло основу химии и стало толчком к многочисленным открытиям. Если вам кажется, что масса исчезла, ищите новые формы — *вуаля*, кислород!

Свет не имел массы. Свет перемещался от источника к приемнику с огромной скоростью без какого-либо толчка. Свет мог быть очень легко создан (испущен) или уничтожен (поглощен). Свет не создавал гравитации. И он не находил места в периодической

таблице элементов, которая систематизировала строительные блоки, составляющие материю.

За много веков до появления современной науки и на протяжении первых двух с половиной веков ее развития деление реальности на материю и свет казалось самоочевидным. Материя обладала массой, а свет никакой массы не имел; масса сохранялась. Пока существовало разделение на массивное и невесомое, создать единое описание материального мира было невозможно.

В первой половине XX века теория относительности и особенно квантовая теория подорвали основы классической физики. Существующие теории, касающиеся материи и света, превратились в руины. Этот процесс творческого разрушения позволил за вторую половину XX века создать новую и более глубокую теорию материи/света, устранившую прошлое разделение. Новая теория воспринимает мир, основываясь на разнообразии заполняющих пространство эфиров, на всеобщности, которую я называю *Сеткой (Grid)*. Новая модель мира является чрезвычайно странной, но в то же время необыкновенно успешной и точной.

Новая модель мира предоставляет нам совершенно новое понимание того, откуда берется масса обычной материи. Насколько новое? Наша масса, как мы узнаем далее, возникает из сочетания, включающего теорию относительности, квантовую теорию поля и хромодинамику — специальные законы, управляющие поведением кварков и глюонов. Вы *не можете* понять, откуда берется масса, без основательного использования всех этих концепций. Однако все они появились только в XX веке, и только специальная теория относительности представляет собой действительно зрелый предмет; квантовая теория поля и хромодинамика по-прежнему являются областями активного исследования, в которых существует множество нерешенных вопросов.

Вдохновившись своими успехами и многому на них научившись, физики вошли в XXI век с идеями для дальнейшего синтеза: идеи, которые приближают к созданию единого описания на первый взгляд различных сил природы, а также единого описания на первый взгляд различных эфиров, которые мы используем сегодня, готовы к тестированию. У нас есть некоторые тонкие намеки на то, что эти идеи ведут нас в правильном направлении. Следующие несколько лет будут потрачены на их тестирование в огромном ускорителе частиц БАК (Большом адронном коллайдере).

Слушай: за углом чертовски славный мир, ей-ей; идем!

Э. Э. Каммингс

Глава 2. Нулевой закон Ньютона

Что есть материя? Ньютоновская физика дала абсолютный ответ на этот вопрос: материя — это то, что обладает массой. Несмотря на то что мы больше не рассматриваем массу в качестве основного свойства материи, она остается важным аспектом реальности, которому мы должны отдать должное.

В книге *«Математические начала натуральной философии»* (1686), монументальном труде, усовершенствовавшем классическую механику и положившем начало эпохи Просвещения, Исаак Ньютон сформулировал три закона движения. По сей день курсы по классической механике обычно начинаются с изучения некоторой версии трех законов Ньютона. Однако эти законы не являются полными. Существует еще один принцип, без которого три закона Ньютона теряют бóльшую часть своей силы. Этот скрытый принцип был настолько основополагающим для ньютоновского восприятия физического мира, что он считал его не законом, управляющим движением материи, а самим *определением* материи.

Когда я преподаю классическую механику, я начинаю с выявления скрытого предположения, которое я называю нулевым законом Ньютона. И я подчеркиваю, что он ошибочен! Как определение

может быть ошибочным? И как ошибочное определение может являться основой великого научного труда?

Легендарный датский физик Нильс Бор различал два вида истины. Для поверхностной, тривиальной истины обратным утверждением является ложь. Для глубокой истины обратным утверждением является глубокая истина. Следуя этой логике, мы могли бы сказать, что поверхностная ошибка заводит в тупик, а глубокая ошибка ведет к прогрессу. Любой человек может совершить тривиальную ошибку, но чтобы совершить глубокую ошибку, нужно быть гением.

Нулевой закон Ньютона представлял собой глубокую ошибку. Она была центральной догмой Старого порядка, который на протяжении более двух столетий главенствовал в физике, химии и астрономии. Только в начале XX века работы Планка, Эйнштейна и других ученых начали оспаривать Старый порядок. К середине века под натиском новых экспериментальных открытий Старый порядок рухнул.

Это разрушение открыло путь новому творению. Наш Новый порядок выявляет совершенно иное понимание материи. Новый порядок основывается на законах, которые отличаются от старых не только деталями, но и формой. В данной книге мы будем изучать эту революцию в базовом понимании и ее последствия.

Однако для оправдания этой революции нам сначала необходимо четко осознать недостатки Старого порядка. Поскольку его ошибки, по классификации Бора, являются глубокими. Старый порядок ньютоновской физики предоставлял нам относительно легкие и простые в использовании правила, которые позволяли довольно эффективно управлять физическим миром. На практике мы по-прежнему используем эти правила для ведения дел в наиболее спокойных, хорошо устоявшихся областях реальности.

Итак, сначала давайте внимательно рассмотрим как огромную силу, так и фатальную слабость скрытого предположения Ньютона, его нулевого закона. Этот закон гласит, что масса не создается и не уничтожается. Что бы ни случилось: столкновения, взрывы, миллионы лет ветров и дождей, — если сложить общую массу всей материи, существующей в начале, в конце или в любой промежуточный момент, вы всегда получите один и тот же результат. На научном сленге это означает, что масса сохраняется. Нулевой закон Ньютона известен под стандартным названием «закон сохранения массы».

Бог и нулевой закон

Разумеется, чтобы превратить нулевой закон в значимое научное утверждение о физическом мире, мы должны указать, как массы измеряются и сравниваются между собой. Мы сделаем это через мгновение. Однако сначала позвольте мне объяснить, почему нулевой закон представляет собой не просто очередной научный закон, а стратегию понимания мира — стратегию, которая на протяжении очень длительного времени показывала себя с очень хорошей стороны.

Примечательно, что сам Ньютон обычно использовал фразу «количество материи», говоря о том, что мы теперь называем массой. Его формулировка подразумевает, что материи без массы быть не может. Масса является предельной мерой материи; она говорит вам, сколько материи у вас есть. Нет массы — нет материи. Таким образом, сохранение массы выражает сохранение материи, а на самом деле равнозначно ему. Для Ньютона нулевой закон был не столько эмпирическим наблюдением или экспериментальным открытием, сколько необходимой истиной; не настоящим законом, а определением. Вернее, как мы далее увидим, он выражал религиозную истину — факт, касающийся Божьего метода творения.

(Во избежание недоразумений позвольте мне подчеркнуть, что Ньютон был дотошным эмпирическим ученым. Он проводил тщательную проверку, стараясь удостовериться в том, что следствия из его определений и предположений описывали Природу настолько точно, насколько их позволяли проверить методы тестирования того времени. Я не говорю, что Ньютон позволял своим религиозным идеям влиять на его воззрения, касающиеся реальности. Все немного тоньше: эти идеи формировали его интуитивное понимание того, как устроена реальность. Ньютон подозревал, что нечто подобное нулевому закону должно было быть правдой, основываясь не на результатах кропотливых экспериментов, а на довольно мощном интуитивном понимании, сформированном его религиозными идеями относительно устройства мира. Ньютон не сомневался в существовании Бога и ставил своей задачей в науке выявление способа, с помощью которого Бог управляет физическим миром.)

В своей более поздней работе «*Оптика*» (1704) Ньютон более конкретно выразил свое видение природы материи:

> *«Мне кажется вероятным, что Бог сначала дал материи форму твердых, массивных, непроницаемых, подвижных частиц таких размеров и фигур и с такими свойствами и пропорциями в отношении к пространству, которые более всего подходили бы к той цели, для которой он создал их. Эти первоначальные частицы, будучи твердыми, несравнимо тверже, чем всякое пористое тело, составленное из них, настолько тверже, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются на куски. Никакая обычная сила не способна разделить то, что создал сам Бог при первом творении».*

Этот примечательный отрывок содержит несколько моментов, на которых нам следует заострить внимание. Во-первых, Ньютон принимает свойство фиксированной массы в качестве одного из самых основных свойств первичных строительных

блоков материи. Он называет их массивными. Для Ньютона масса — это не то, что следует стремиться объяснить в каких-то более простых терминах. Она является частью базового описания материи, то есть достигает самых основ. Во-вторых, Ньютон приписывает наблюдаемые в мире изменения исключительно *перегруппировкам* элементарных строительных блоков, элементарных частиц. Сами по себе эти строительные блоки не создаются и не разрушаются — они просто перемещаются. После того как Бог их создал, их свойства, включая массу, никогда не меняются. Ньютоновский нулевой закон движения, закон сохранения массы, следует из этих двух предположений.

Возвращаемся в реальность

Теперь мы должны оставить эти опьяняющие философско-богословские идеи о том, почему сохранение массы может или должно быть правдой, и перейти к обычным измерениям, чтобы проверить их истинность.

Как мы измеряем массу? Наиболее известный способ заключается в использовании весов. Один из видов весов, которые имеются в ванной комнате сидящего на диете человека, сравнивает, насколько тело (имеется в виду тело этого человека) может сжать пружину. Похожим образом устроены весы, используемые рыбаками для сравнения, насколько сильно висящие тела (имеется в виду рыба) могут пружину растянуть. Степень растяжения или (для того, кто сидит на диете) сжатия пружины пропорциональна приложенной к телу и направленной вниз силе, которую мы называем весом тела, пропорциональным его массе.

Исходя из этого очень конкретного и практического критерия, сохранение массы говорит о том, что замкнутая система будет продолжать так же сильно растягивать пружину, что бы ни происходило внутри. Это подтвердил Антуан Лоран Лавуазье (1743–1784)

с помощью, конечно же, более сложных и точных весов, чем те, которые находятся в вашей ванной комнате, в ходе многочисленных тщательных экспериментов, принесших ему титул отца современной химии. С помощью самых разнообразных химических реакций Лавуазье подтвердил равенство общего веса исходного материала и общего веса материала после реакции с максимальной доступной ему степенью точности (как правило, до тысячных долей или около того). Благодаря учету *всего* вещества, участвующего в реакции, включая газы, которые могли улетучиться, пепел, оставшийся после взрывов и т. д., он обнаруживал новые соединения и элементы. Лавуазье был обезглавлен во время Французской революции. Математик Жозеф Лагранж сказал: «Им потребовалась лишь секунда на то, чтобы отрубить эту голову, однако на создание подобной головы Франции может понадобиться не один век».

Использование весов для сравнения массы является практичным и эффективным способом, однако он не подходит в качестве общего, принципиального определения массы. Например, если ваше тело окажется в космосе, то его вес, измеренный с помощью весов, будет меньше, однако его масса останется прежней. (Весы соврут, а обхват талии не уменьшится.) Если закон сохранения массы является правдой, то лучше бы, чтобы масса оставалась той же! И это замкнутое на себя утверждение имеет реальное содержание, поскольку вы можете сравнить массы и другими способами. Например, можно сравнить скорость полета двух пушечных ядер, выстрелив ими из одной и той же пушки. Согласно другим ньютоновским законам движения, начальный импульс задает скорость, обратно пропорциональную массе. Поэтому, если одно пушечное ядро вылетит из пушки в два раза быстрее, чем другое, значит, оно имеет в два раза меньшую массу, вне зависимости от того, проводите вы этот эксперимент на поверхности Земли или в космосе.

Я не буду вдаваться в технические подробности процесса измерения массы, только скажу, что существует множество способов

это сделать помимо использования весов и выстрелов из пушек, а также множество методов проверки их непротиворечивости друг другу.

Ниспровержение

Нулевой закон Ньютона признавался учеными на протяжении более двух столетий, и не только потому, что он соответствовал некоторым философским или богословским воззрениям. Он признавался потому, что работал. Вместе с остальными ньютоновскими законами движения и законом тяготения нулевой закон формирует основу математической дисциплины — классической механики, которая с удивительной точностью описывает движение планет и их спутников, странное поведение гироскопов и многие другие явления. Эти законы блестяще работают и в химии.

Однако происходит это не всегда. На самом деле закон сохранения массы может не работать.

На Большом электрон-позитронном коллайдере (БЭПК, Large Electron-Positron Collider, LEP), который на протяжении 1990-х годов работал в лаборатории ЦЕРН близ Женевы, электроны и позитроны (антиэлектроны) разгонялись до скоростей, на одну стомиллиардную (10^{-11}) меньше скорости света. После того как разгонявшиеся в противоположных направлениях частицы врезались друг в друга, оставалось множество осколков. В результате типичного столкновения могло получиться 10 π-мезонов (пи-мезонов, пионов), протон и антипротон. Теперь сравним общую массу до и после:

электрон + позитрон: 2×10^{-28} граммов;
10 пионов + протон + антипротон: 6×10^{-24} граммов.

То, что получается в результате, весит примерно в *30 000 раз* больше того, что было до столкновения. Ого!

Не многие законы когда-либо казались более фундаментальными, успешными и тщательно проверенными, чем закон сохранения массы. Тем не менее в данном случае он совершенно не подтверждается. Это похоже на то, как волшебник бросает в свою шляпу две горошины и вытаскивает из нее несколько десятков кроликов. Однако Мать-природа — не дешевый обманщик; ее «магия» представляет собой глубокую истину. Нам предстоит кое-что прояснить.

Имеет ли масса происхождение?

Пока считалось, что масса сохраняется, не было смысла спрашивать о ее происхождении. Она всегда неизменна. Точно так же вы могли бы спросить о происхождении числа 42. (На самом деле на этот вопрос существует своего рода ответ. Если масса сохраняется во всех случаях, за исключением тех, когда Бог создает элементарные частицы, то Бог является источником массы. Таков был ответ Ньютона. Однако это не тот тип объяснения, которого мы будем придерживаться в данной книге.)

В рамках классической механики ни один ответ на вопрос: «Откуда берется масса?» — не имеет смысла. Пытаясь получить массивные объекты из безмассовых, мы неизменно сталкиваемся с противоречиями. Это можно увидеть по-разному. Например:

- основа классической механики, уравнение $F = ma$, описывает отношение динамической концепции силы (F), суммирующей все ощущаемые телом воздействия, и кинематической концепции ускорения (a), которое определяет, как движется это тело в результате данных воздействий. Масса (m) является связующим звеном между этими двумя концепциями. В ответ на действие данной силы тело с малой массой будет набирать скорость быстрее, чем тело с большой массой. Тело нулевой массы сошло бы с ума! Чтобы понять, как оно должно двигаться,

пришлось бы делить на ноль, что считается недопустимым. Поэтому для начала телу лучше бы иметь какую-то массу;

- в соответствии с ньютоновским законом тяготения каждое тело производит гравитационное воздействие, пропорциональное его массе. Пытаясь представить себе, что тело с ненулевой массой может состоять из не имеющих массы строительных блоков, вы приходите к противоречию. Гравитационное действие каждого строительного блока равно нулю, и неважно, сколько раз вы добавляете ноль к нулю, — вы все равно получите нулевое действие.

Но если масса не сохраняется — а она не сохраняется! — мы можем поискать ее источник. Это еще не основа. Мы можем копнуть глубже.

Глава 3. Второй закон Эйнштейна

Второй закон Эйнштейна, $m = E / c^2$, поднимает вопрос о том, может ли масса быть понята более глубоко — как энергия. Можем ли мы создать, как выразился Уилер, «массу без массы»?

Когда я еще только собирался начать преподавать в Принстоне, мой друг и наставник Сэм Трейман позвал меня в свой кабинет. Он хотел поделиться со мной своей мудростью. Сэм вытащил из ящика стола потрепанное руководство в мягкой обложке и сказал мне: «Во время Второй мировой войны ВМС приходилось в спешке обучать новобранцев налаживанию и использованию радиосвязи. Многие из этих новобранцев прибывали прямо с ферм, так что быстро ввести их в курс дела было очень трудно. С помощью той великолепной книги командованию военно-морского флота это удалось. Это шедевр педагогики. Особенно первая глава. Взгляни».

Он вручил мне книгу, открытую на первой главе. Она называлась «Три закона Ома». Я был знаком с одним законом Ома, известным соотношением $V = IR$, который связывает напряжение (V), силу тока (I) и сопротивление (R) в электрической цепи. Это оказалось первым законом Ома.

Мне было очень интересно узнать, каковы два других закона Ома. Перевернув несколько хрупких пожелтевших страниц, я обнаружил второй закон Ома: $I = V / R$. Я предположил, что третий закон Ома формулируется как $R = I / V$, и оказался прав.

Открывать новые законы легко

Тем, кто знаком с элементарной алгеброй, так очевидно, что эти три закона эквивалентны друг другу, что данная история воспринимается как шутка. Однако в ней заключен глубокий смысл. (Кроме того, в ней есть и неглубокий смысл, который, как мне кажется, Сэм хотел до меня донести. При обучении начинающих вы должны несколько раз сказать одно и то же, но по-разному. Соотношения, которые бесспорны для профессионала, могут не быть таковыми для новичка. Студенты не будут возражать против объяснения очевидного. Очень немногие люди обижаются, когда вы позволяете им почувствовать себя умными.)

Глубокий смысл содержит заявление великого физика-теоретика Поля Дирака. Когда его спросили, как он открывает новые законы природы, Дирак ответил: «Я играю с уравнениями». Суть в том, что различные способы написания одного и того же уравнения могут говорить о совершенно разных вещах, даже если они являются логически эквивалентными.

Второй закон Эйнштейна

Второй закон Эйнштейна формулируется следующим образом:

$$m = E / c^2.$$

Первый закон Эйнштейна — это, разумеется, $E = mc^2$. Здорово, что первый закон предполагает возможность получения большого количества энергии из небольшого количества массы. Он наводит на мысль о ядерных реакторах и ядерных бомбах.

Второй закон Эйнштейна предполагает нечто совершенно иное. Он предполагает возможность объяснения того, как масса возникает из энергии.

На самом деле этот закон неправильно называть «вторым». В оригинальной работе Эйнштейна 1905 года вы не найдете уравнения $E = mc^2$. Вы встретите уравнение $m = E / c^2$. (Поэтому, возможно, нам следует назвать его нулевым законом Эйнштейна.) На самом деле в качестве названия этой статьи используется вопрос: «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?» Другими словами, может ли некоторое количество массы тела возникать из энергии содержащегося в нем вещества? С самого начала Эйнштейн размышлял о концептуальных основах физики, а не о возможности создания бомб или реакторов.

Понятие энергии играет гораздо более важную роль в современной физике, чем понятие массы. Это проявляется во многих отношениях. Сохраняется именно энергия, а не масса. Именно энергия фигурирует в таких фундаментальных уравнениях, как уравнение Больцмана для статистической механики, уравнения Шредингера для квантовой механики и уравнение Эйнштейна для гравитации. Масса в более техническом смысле проявляется в качестве метки для неприводимых представлений группы Пуанкаре. (Я даже не буду пытаться объяснить, что означает предыдущее утверждение, к счастью, суть заключается в самом факте утверждения.)

Таким образом, вопрос Эйнштейна бросает вызов. Если мы сможем объяснить массу в терминах энергии, мы улучшим наше описание мира. В этом случае в нашем рецепте нам потребуется меньшее количество ингредиентов.

Второй закон Эйнштейна позволяет дать хороший ответ на вопрос, который мы задали ранее. Откуда берется масса? Может быть, из энергии. На самом деле, как мы увидим далее, в основном так и есть.

Часто задаваемые вопросы

Разберем два отличных вопроса, которые люди часто задают мне на моих публичных лекциях о происхождении массы. Если они возникли и у вас, примите мои поздравления! Эти вопросы касаются основных сложностей, связанных с возможностью объяснения массы в терминах энергии.

Вопрос 1: если $E = mc^2$, то масса пропорциональна энергии. Таким образом, если сохраняется энергия, не значит ли это то, что масса тоже сохраняется?

Ответ 1: короткий ответ заключается в том, что уравнение $E = mc^2$ на самом деле применяется только к изолированным телам в состоянии покоя. Жаль, что это наиболее известное широкой публике уравнение физики иногда бывает непригодно. Обычно, когда речь идет о движущихся или взаимодействующих телах, энергия и масса не являются пропорциональными. В этих случаях уравнение $E = mc^2$ просто не применяется.

Более подробный ответ можно найти в приложении А: «Частицы имеют массу, а мир — энергию».

Вопрос 2: как может что-то состоящее из не имеющих массы строительных блоков испытывать воздействие гравитации? Разве Ньютон не говорил нам о том, что сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна его массе?

Ответ 2: в своем законе тяготения Ньютон действительно сказал, что действующая на тело сила тяжести пропорциональна его массе. Однако Эйнштейн в своей более точной теории гравитации, общей теории относительности, сказал нечто другое. Всю эту историю довольно сложно описать, и я не буду пытаться сделать это в данной книге. Очень грубо говоря, там, где Ньютон говорит, что сила пропорциональна m, более точная теория Эйнштейна говорит, что эта сила пропорциональна E / c^2. Как мы уже говорили в предыдущем вопросе и ответе, это не одно и то же. Эти параметры

почти одинаковы для изолированных, медленно движущихся тел, однако они могут быть очень разными для взаимодействующих систем тел или для тел, движущихся со скоростью, близкой к скорости света.

На самом деле сам свет является наиболее ярким примером. Частицы света, фотоны, имеют нулевую массу. Тем не менее свет отклоняется под действием силы тяжести, так как фотоны имеют ненулевую энергию, а сила тяжести воздействует на энергию. Действительно, одно из самых ярких подтверждений общей теории относительности — это отклонение лучей света Солнцем. В данной ситуации гравитация Солнца воздействует на не имеющие массы фотоны.

Если продолжить эти размышления, то одним из самых впечатляющих следствий общей теории относительности станет возможность представить себе объект с такой сильной гравитацией, что она изменяет траекторию фотонов. И настолько сильно, что частицы движутся назад, даже если сначала они двигались вперед. Такой объект представляет собой ловушку для фотонов. Ни одна частица света не может из нее выбраться. Это черная дыра.

Глава 4. Состав материи

Из чего состоит мир? Мы объясним происхождение 95 % массы материи из чистой энергии. Для достижения такой точности нам придется быть очень конкретными. В данной главе мы расскажем, чем является и чем не является обычная материя.

«Обычная» материя — это то, что мы изучаем в химии, биологии и геологии. Материал, который мы используем для создания вещей, и то, из чего состоим мы сами. Обычная материя — это в том числе то, что видят астрономы, глядя в свои телескопы. Планеты, звезды и туманности состоят из того же вещества, которое мы находим и исследуем здесь, на Земле. Это величайшее открытие астрономии.

Однако недавно астрономы сделали еще одно великое открытие. Как ни странно, оно заключается в том, что обычная материя — это *не все,* что есть во Вселенной. Далеко не все. На самом деле большая часть массы Вселенной в целом представлена по крайней мере двумя другими формами — так называемой темной материей и темной энергией. «Темная» материя, оказывается, совершенно прозрачна, и именно поэтому она ускользала от взглядов ученых в течение сотен лет. До сих пор ее удалось обнаружить лишь косвенно, благодаря гравитационному воздействию, которое она оказывает на обычную материю (то есть звезды и галактики). В следующих главах мы поговорим о темной материи более подробно.

Если вы просто подсчитаете массу, то обычная материя окажется незначительной примесью, составляющей лишь 4–5 % от общего количества. Однако именно она содержит основную часть сооружений и устройств, информации и любви, присутствующих в мире. Поэтому я надеюсь, вы согласитесь, что эта часть является особенно интересной. И это именно та часть, которую мы лучше всего понимаем в настоящее время.

В следующих нескольких главах мы объясним происхождение 95 % массы обычной материи, начав с не обладающих массой строительных блоков. Для исполнения этого обещания мы должны быть очень конкретными в своем объяснении. (В конце концов, мы оперируем цифрами.)

Строительные блоки. Предположение о том, что материю* можно разложить на несколько типов элементарных строительных блоков, восходит по меньшей мере к древним грекам, однако четкое научное понимание этого сформировалось только в XX веке. Обычно люди говорят, что материя состоит из атомов. Великий физик Ричард Фейнман в начале своих знаменитых лекций по физике сделал важное замечание об этом:

> *«Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались уничтоженными и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то какое утверждение, составленное из наименьшего количества слов, могло бы передать наибольшую информацию? Я считаю, что это —* ***атомная гипотеза*** *(или* ***факт****, или как угодно), которая заключается в том, что* ***все тела состоят из атомов****...» (выделение автора).*

* Начиная отсюда и вплоть до главы 8, я буду опускать прилагательное «обычная», говоря об обычной материи, и вместо этого буду использовать только термин «материя». Мы не будем обращаться к «темной стороне» до тех пор. — *Примеч. авт.*

Тем не менее великий и самый полезный «факт» того, что все вещи состоят из атомов, является неполным в трех важных отношениях. (Подобно нулевому закону Ньютона или величайшему открытию в астрономии, эта глубокая, в значении Бора, истина является *глубоко* ложной.)

Одним из них является существование темной материи и темной энергии, о которых мы уже упоминали. Когда фейнмановские лекции в 1963 году были опубликованы, о их существовании только начали подозревать. Несколько астрономов, начиная с Фрица Цвикки, начали работу над решением того, что они назвали проблемой недостающей массы, уже в 1933 году. Однако замеченные ими аномалии представляли собой только небольшую часть из многих других в зарождающейся науке наблюдательной космологии, и лишь некоторые ученые сразу восприняли их всерьез. В любом случае существование темной материи и темной энергии на самом деле не влияет на смысл сказанного Фейнманом. На начальных этапах реконструкции науки после катаклизма* знание о существовании темной материи и темной энергии было бы обременительной роскошью.

Два других гораздо более приземленных уточнения на самом деле имеют центральное значение. Они действительно должны быть включены в наше состоящее из единственного предложения послание к будущим поколениям существ, даже если бы это привело к тому, что одна фраза превратилась бы в такое длинное предложение, использования которого мои учителя рекомендовали мне избегать и за которое снимали баллы на экзамене, несмотря на то что Генри Джеймс и Марсель Пруст стали очень известными, несмотря на использование только такого рода предложений, потому что они приемлемы, если вы пишете литературные произведения, но никуда не годятся при передаче информации.

---

* Предполагается катаклизм, обсуждаемый во вставке из фейнмановских лекций (см. выше). — *Примеч. науч. ред.*

Во-первых, есть материя света. Свет является самым важным элементом «всех вещей», и он, разумеется, совершенно отличен от атомов. Существует естественная склонность рассматривать свет в качестве чего-то абсолютно непохожего на материю, в качестве нематериального или даже духовного. Свет действительно *на вид* довольно сильно отличается от вещественной материи, то есть от материи, о которую вы можете споткнуться и потоки которой могут сбить вас с ног. Было бы целесообразно поведать тем, кто уцелеет после апокалипсиса, гипотезу Фейнмана о том, что свет представляет собой еще одну форму материи. Можно даже сказать им, что свет тоже состоит из частиц — фотонов.

Во-вторых, атомы — это еще не все. Они состоят из более фундаментальных строительных блоков. Несколько подобных подсказок направили бы уцелевших людей по пути развития научной химии и электроники.

Соответствующие факты можно резюмировать в нескольких предложениях. (Я не буду пытаться уместить их в одной фразе.) Все вещи состоят из атомов и фотонов. Атомы, в свою очередь, состоят из электронов и атомных ядер. Размер ядра гораздо меньше, чем размер самого атома (он составляет примерно одну стотысячную, или 10^{-5}, радиуса), однако ядро содержит весь положительный электрический заряд и почти всю массу атома — более 99,9 %. Целостность атома поддерживается благодаря электрическому притяжению между электронами и ядрами. И наконец, ядра состоят из протонов и нейтронов. Ядра скрепляются другой силой, которая является гораздо более мощной, чем электрическая сила, но действует только на коротких расстояниях.

Этот рассказ о материи отражает состояние научного знания, характерного для 1935 года. Это то, что вы по-прежнему находите в большинстве вводных курсов физики. Чтобы отдать должное нашему самому лучшему современному пониманию, мы должны будем проверить, изменить и уточнить почти каждое написанное

в этих учебниках слово. Например, теперь мы знаем, что протоны и нейтроны представляют собой сложные объекты, состоящие из более элементарных кварков и глюонов. Мы доберемся до этих уточнений в последующих главах. Однако представление 1935 года полезно в качестве удобного эскиза, общего описания, позволяющего достаточно ясно видеть только то, что нам нужно сделать для выяснения происхождения массы.

Большая часть массы находится в атомных ядрах, а ядра состоят из протонов и нейтронов. Масса электронов составляет менее 1 %, а масса фотонов — еще меньше. Таким образом, вопрос о происхождении массы обычной материи принимает вполне определенную форму. Чтобы определить происхождение большей части массы вещества — более 99 %, — мы должны выяснить происхождение массы протонов и нейтронов, а также понять, как эти частицы объединяются в атомные ядра. Ни больше ни меньше.

Глава 5. Гидра внутри

«Старое» понимание атомного ядра в виде системы протонов и нейтронов, склеенных между собой или вращающихся друг вокруг друга, в конечном счете самоликвидировалось. Физики, искавшие силы, которые действуют на устойчивые частицы, вместо этого открыли изумительный новый мир превращений и неустойчивости.

В 1930 году стало понятно направление для следующего шага на пути к созданию полной теории материи. Путешествие вглубь атома достигло предела — его ядра.

Большая часть массы вещества заключена в атомных ядрах. Электрический заряд, сосредоточенный в них, создает электрические поля, которые определяют движение окружающих электронов. Ядра намного тяжелее, и поэтому обычно движутся гораздо медленнее, чем электроны. Последние являются действующими лицами в химических и биологических процессах (не говоря уже об электронике), а ядра находятся за кулисами и пишут сценарии.

Несмотря на то что в биологии, химии и электронике атомные ядра в основном остаются в тени, они блистают в истории о звездах. Именно из перекомпоновки и превращений ядер звезды, в том числе, конечно же, наше Солнце, черпают свою энергию. Таким образом, важность понимания атомных ядер была и остается очевидной.

Однако в 1930 году упомянутое понимание было примитивным, и задача его развития встала в физике очень остро. В своих лекциях Энрико Ферми рисовал нечеткое облако в центре диаграммы атома с пометкой: «Здесь драконы», как в древних картах. Здесь проходила граница того, что предстояло изучить.

Драконы Ферми

С самого начала было ясно, что ядерным миром правят другие, новые силы. Классическими силами доядерной физики являются гравитация и электромагнетизм. Однако в ядрах действуют отталкивающие силы: ядро имеет общий положительный заряд, а одноименные заряды отталкиваются. Гравитационные силы, действующие на небольшое количество массы в любом отдельно взятом ядре, слишком слабы, чтобы преодолеть электрическое отталкивание. (Мы гораздо подробнее поговорим о слабости гравитации во второй части этой книги.) Нужна была новая сила. Она получила название сильного взаимодействия. Чтобы ядра оставались плотно связанными друг с другом, сильное взаимодействие должно было быть более мощным, чем любое из ранее известных.

Потребовались десятки лет усилий экспериментаторов и изощрений теоретиков, чтобы обнаружить фундаментальные уравнения, описывающие то, что происходит в атомных ядрах. Удивительно, что людям вообще удалось их найти.

Очевидная трудность заключается в том, что наблюдать эти уравнения в действии мешает малый размер атомного ядра. Оно примерно в 100 000 раз меньше самого атома. Это уводит нас в миллион раз дальше за пределы нанотехнологии. Ядра относятся к области микронанотехнологий. Пытаясь манипулировать ядрами с помощью макроскопических инструментов, например весов или обычного пинцета, мы получаем результат хуже, чем у великана,

пытающегося поднять песчинку с помощью пары Эйфелевых башен. Это трудная задача. Для изучения ядерного мира необходимо было разработать совершенно новые методы проведения экспериментов и создать необычные виды инструментов. В следующей главе мы посетим ультрастробоскопический наномикроскоп (известный как Стэнфордский линейный ускоритель (Stanford Two Mile Linear Accelerator, SLAC)) и станцию творческого разрушения (известную как Большой электрон-позитронный коллайдер (Large Electron-Positron collider, LEP; по-русски БЭПК), где были сделаны открытия, имеющие центральное значение для нашего повествования.

Другая трудность заключалась в том, что микронанокосм, как оказалось, следует законам, совершенно отличным от всего изученного ранее. Прежде чем отдать должное сильному взаимодействию, физики должны были отказаться от естественного для человека образа мыслей и заменить его странными новыми идеями. Мы рассмотрим эти идеи подробнее в нескольких следующих главах. Они настолько странные, что, если я просто приведу их в качестве фактов, они не покажутся вам правдоподобными*, впрочем, они и не должны таковыми казаться. Некоторые из новых идей совершенно отличаются от всего известного прежде. Они могут противоречить — и, вероятно, на самом деле противоречат! — тому, что вы изучали в школе. (Это зависит от того, в какую школу вы ходили и когда.) В данной короткой главе я объясню, что подтолкнуло нас к революции. Эта глава служит для объединения традиционной концепции ядерной физики, которая по-прежнему приводится в большинстве попадавшихся мне учебников по физике для старшеклассников и первокурсников, с нашим новым пониманием.

* Ближе к концу этой книги я расскажу о других странных идеях, доказательства которых выглядят еще менее убедительно. Я хочу, чтобы вы ощутили разницу! — *Примеч. авт.*

Борьба с драконами

Открытие Джеймсом Чедвиком нейтрона в 1932 году стало знаковым событием. После открытия Чедвика путь к пониманию представлялся простым. Казалось, что обнаружены строительные блоки ядер. Ими являются протоны и нейтроны, два вида частиц, которые весят примерно одинаково (нейтрон на 0,2 % тяжелее) и имеют аналогичные *сильные* взаимодействия. Наиболее очевидные различия между протонами и нейтронами заключаются в том, что протон имеет положительный электрический заряд, а нейтрон электрически нейтрален. Кроме того, изолированный нейтрон нестабилен. Период его существования — около 15 минут, после чего нейтрон превращается в протон (и при этом также возникают электрон и антинейтрино). Просто складывая вместе протоны и нейтроны, вы могли бы создавать модели ядра с разными зарядами и массами, которые примерно соответствуют аналогичным параметрам известных ядер.

Казалось, что понимание и уточнение этих моделей было лишь вопросом измерения сил, действующих на протоны и нейтроны. Данные силы удерживали бы ядра от распада. Уравнения, описывающие эти силы, стали бы теорией сильного взаимодействия. Решая уравнения указанной теории, мы могли проверить ее и сделать прогнозы. Таким образом, мы бы написали новую лаконичную главу под названием «ядерная физика», центральной идеей которой стала бы «ядерная сила», описываемая простым и элегантным уравнением.

Такая программа действий вдохновила экспериментаторов на изучение столкновений протонов с другими протонами (нейтронами или другими ядрами). Мы называем такие эксперименты, в процессе которых сталкивают частицы с другими и изучают то, что получилось, экспериментом по рассеянию. Идея заключается в том, что, изучая отклонение протонов и нейтронов, или, как мы говорим, рассеяние, вы можете определить, какие силы на них действуют.

Эта простая стратегия с треском провалились. Во-первых, сила оказалась очень сложной. Было установлено, что она имеет сложную зависимость не только от расстояния между частицами, но и от их скоростей и направлений их спинов*. Вскоре стало ясно, что нам не удастся обнаружить простой и красивый закон для этой силы, достойный места в одном ряду с законом тяготения Ньютона или законом Кулона для электричества.

Во-вторых, что было еще хуже, «сила» не была силой. При столкновении двух энергичных протонов происходит *не просто* их отклонение. Часто в результате образуется более двух частиц, которые не обязательно являются протонами. В самом деле в ходе проводимых физиками экспериментов по рассеянию при высокой энергии таким образом были обнаружены многие новые виды частиц. Новые частицы, которых были найдены десятки, нестабильны, поэтому мы обычно не наблюдаем их в природе. Однако при их подробном изучении оказалось, что другие их свойства, особенно сильные взаимодействия и размер, подобны аналогичным параметрам протонов и нейтронов.

После этих открытий стало неестественно рассматривать протоны и нейтроны сами по себе или думать, что основная проблема заключается в определении сил, обусловливающих их взаимодействие. Вместо этого «ядерная физика» в традиционном понимании стала частью более крупного предмета, включающего все новые частицы и очевидно сложные процессы их создания и распада. Для описания нового «зоопарка» элементарных частиц, этого нового вида драконов, было придумано название «адрон».

---

* Как протоны, так и нейтроны все время вращаются: мы говорим о том, что им присущ фундаментальный спин. В дальнейшем мы гораздо подробнее побеседуем о фундаментальном спине. Это свойство играет важную роль в современных представлениях о конечном объединении сил. — *Примеч. авт.*

Гидра

Опыт в области химии предполагал возможность объяснения всех этих сложностей. Может быть, протоны, нейтроны и другие адроны не являются элементарными частицами. Может быть, они состоят из более простых объектов, обладающих более простыми свойствами.

В самом деле, если вы проведете над атомами и молекулами такие же эксперименты, что и над протонами и нейтронами, изучая то, что остается после их столкновений, вы также получите сложные результаты. Вы могли бы перестраивать и разлагать молекулы для получения их новых видов (или возбужденных атомов, ионов и радикалов), иными словами, проводить химические реакции. Простому закону взаимодействия подчиняются только электроны и ядра. Атомы и молекулы, состоящие из многих электронов и ядер, ему не подчиняются. Может ли существовать аналогичная закономерность для протонов, нейтронов и их недавно обнаруженных сородичей? Может ли их очевидная сложность объясняться тем, что они состоят из более мелких строительных блоков, которые подчиняются гораздо более простым законам?

Разламывание чего-либо на куски может быть грубым способом, однако этот метод может оказаться и самым надежным для выяснения того, из чего оно состоит. Если достаточно сильно столкнуть два атома, они распадутся на составляющие их электроны и ядра. Так обнаруживаются строительные блоки, из которых они состоят.

Тем не менее поиск более простых строительных блоков внутри протонов и нейтронов привел к необычным трудностям. Если вы действительно сильно столкнете между собой протоны, то в результате получите еще больше протонов, иногда в сопровождении их адронных родственников. Типичным результатом при столкновении двух протонов при высокой энергии является появление трех протонов, антинейтрона и нескольких пи-мезонов. Общая

масса появившихся в результате частиц превышает массу исходных. Мы обсуждали эту возможность ранее, и вот она снова нас настигла. Вместо того чтобы открыть более мелкие и легкие строительные блоки, переходя ко все более высокой энергии и производя все более сильные столкновения, вы просто находите еще больше того же самого. Тенденции к упрощению не наблюдается. Это все равно, как если бы вы столкнули между собой два яблока одного сорта и получили три яблока того же сорта, одно яблоко другого сорта, дыню, десяток вишен и пару кабачков.

Дракон Ферми превратился в кошмарную гидру из мифа. Отрежьте гидре голову, и на ее месте появится несколько новых.

Более простые строительные блоки *существуют*. Однако их фундаментальная «простота» подразумевает странное и парадоксальное поведение, которое делает их как революционными для теории, так и неуловимыми во время экспериментов. Чтобы их понять или даже *воспринять*, нам придется начать все с начала.

Глава 6. Фрагменты элементарных частиц

Введенные в качестве теоретической импровизации и никогда не наблюдаемые в изоляции кварки поначалу казались удобным вымыслом. Но когда они появились на снимках протонов, сделанных с помощью ультрастробоскопического наномикроскопа, кварки превратились в неудобную действительность. Их странное поведение поставило под сомнение основные принципы квантовой механики и теории относительности. Новая теория заново открыла кварки в качестве идеальных объектов математического совершенства. Уравнения этой новой теории также требовали новых частиц, цветных глюонов. Цветные глюоны суть воплощение идеи симметрии. Спустя несколько лет люди начали делать снимки кварков и глюонов в специально созданных для этого центрах творческого разрушения.

Название этой главы имеет два смысла. Первый заключается в существовании более мелких фрагментов в том, что совсем недавно считалось мельчайшими строительными блоками обычной материи, — в протонах и нейтронах. Эти более мелкие фрагменты

называются кварками и глюонами. Разумеется, название чего-либо не объясняет его сути, как говорилось в трагедии Шекспира:

«Что значит имя? Роза пахнет розой,
Хоть розой назови ее, хоть нет».

Это подводит нас ко второму, более глубокому, смыслу. Если бы кварки и глюоны представляли собой просто еще один слой в бесконечной, напоминающей луковицу сложной структуре внутри структуры, их названия были бы впечатляющими звучными словечками, с помощью которых вы могли бы впечатлить друзей на коктейльной вечеринке, но сами по себе они представляли бы интерес только для экспертов. Однако кварки и глюоны — это не «просто еще один слой». Правильно понятые, они в корне меняют наше представление о природе физической реальности, поскольку являются фрагментами в другом, гораздо более глубоком смысле, который мы используем, когда говорим о фрагментах информации. В определенной степени это качественно новые в науке *воплощенные идеи*.

Например, описывающие глюоны уравнения были открыты раньше, чем сами глюоны. Они принадлежат к классу уравнений, изобретенному Чжэньнином Янгом и Робертом Миллсом в 1954 году в качестве естественно-математического обобщения уравнений электродинамики Максвелла. Уравнения Максвелла уже давно были известны своей симметрией и мощью. Генрих Герц, немецкий физик, экспериментально доказавший существование предсказанных Максвеллом новых электромагнитных волн (которые мы сегодня называем радиоволнами), сказал об уравнениях Максвелла следующее:

«Невозможно отделаться от ощущения, что эти математические формулы существуют независимо от нас и обладают собственным разумом, что они мудрее нас, мудрее даже тех, кто их открыл, и что мы извлекаем из них больше, чем изначально в них поместили».

Уравнения Янга — Миллса подобны уравнениям Максвелла на стероидах. Они поддерживают множество видов зарядов, а не только один (электрический заряд), использующийся в уравнениях Максвелла. Кроме того, они поддерживают симметрию между этими зарядами. Их особый вариант, применимый к реальным глюонам сильного взаимодействия и использующий три заряда, был предложен Дэвидом Гроссом и мной в 1973 году. Эти три вида зарядов, которые фигурируют в теории сильного взаимодействия, обычно называют цветными зарядами или просто цветом, хотя, конечно, они не имеют ничего общего с цветом в обычном смысле этого слова.

Мы подробнее обсудим кварки и глюоны в следующих главах. С самого начала главы, начиная с названия, я хочу подчеркнуть, что кварки и глюоны, а точнее, их поля представляют собой математически полные и совершенные объекты. Вы можете полностью описать их свойства, используя только концепции, без необходимости представлять образцы или делать какие-либо измерения. И вы не можете изменить эти свойства. Вы не в состоянии играть с этими уравнениями, не ухудшив их (то есть не сделав их противоречивыми). Глюоны — это объекты, которые подчиняются уравнениям глюонов.

Однако достаточно этой вольной рапсодии! Чистая математика полна прекрасных идей. Особая музыка физики заключается в гармонии между красивыми идеями и действительностью. Пришло время вернуться в реальность.

Кварки: бета-версия

К началу 1960-х годов экспериментаторы обнаружили десятки адронов с разными массами, временем жизни и характерным вращением (спином). Огромное количество открытий вскоре привело к некоторому «похмелью», поскольку простое накопление любопытных фактов при отсутствии какого-либо более глубокого

смысла дурманило разум. В 1955 году в своей речи по случаю вручения Нобелевской премии Уиллис Лэмб пошутил:

> *«Когда Нобелевская премия была впервые присуждена в 1901 году, физики кое-что знали всего о двух объектах, которые сейчас называются элементарными частицами: об электроне и протоне. После 1930 года появилось множество других "элементарных" частиц: нейтронов, нейтрино, мю-мезонов, пи-мезонов, более тяжелых мезонов, а также различных гиперонов. Я слышал, как кое-кто говорит, что "за открытие новой элементарной частицы раньше давали Нобелевскую премию, но в настоящее время за такое открытие следует наказывать штрафом в размере 10 000 долларов"».*

В этой ситуации Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг совершили большой прорыв в теории сильного взаимодействия, предложив кварковую модель. Они показали, что закономерности в массах, времени жизни и спинах адронов встали бы на свои места, если бы вы представили, что адроны состоят из нескольких более мелких объектов, которые Гелл-Манн назвал кварками. Десятки адронов можно было бы по крайней мере приблизительно понимать как различные комбинации, составленные всего из трех сортов *(ароматов)* кварков: верхнего — *u*, нижнего — *d* и странного — *s**.

Как можно создать десятки адронов из нескольких сортов кварков? Какие простые правила стоят за этими сложными закономерностями?

Изначальные правила представляли собой импровизацию, подогнанную под наблюдения, и были несколько странными. Они определили то, что называется кварковой моделью. Согласно ей

---

* Сорта кварков не следует путать с их цветными зарядами. Цветной заряд представляет собой другое, дополнительное, свойство. Существуют *u*-кварки с зарядом красного цвета, *u*-кварки с зарядом желтого цвета и т. д. Таким образом, при наличии трех сортов и трех цветов мы имеем всего 3 × 3 = 9 видов. — *Примеч. авт.*

существует только две основные структуры адронов. *Мезоны* состоят из кварка и антикварка. *Барионы* состоят из трех кварков. (Существуют также антибарионы, состоящие из трех антикварков.) Таким образом, есть лишь несколько возможных комбинаций различных сортов кварков и антикварков, образующих мезоны: вы можете комбинировать *u* с анти-*d* или *d* с анти-*s* и т. д. Точно так же для барионов существует лишь несколько возможных комбинаций.

Согласно кварковой модели, большое разнообразие адронов зависит не столько от того, какие фрагменты вы складываете вместе, сколько от того, как именно вы их складываете. Если конкретно, то данный набор кварков может быть организован на различных пространственных орбитах с выровненными по-разному спинами примерно так же, как пары или тройки звезд могут быть связаны друг с другом действием силы тяжести.

Существует принципиальная разница между субмикроскопическими «звездными системами» кварков и их макроскопическими аналогами. В то время как макроскопические солнечные системы, управляемые законами классической механики, могут иметь всевозможные размеры и формы, их микроскопические версии этого не могут. Для микроскопических систем, которые подчиняются законам квантовой механики, существуют ограничения, касающиеся разрешенных орбит и направлений спинов*. Мы говорим, что система может находиться в различных квантовых *состояниях*. Каждая допустимая конфигурация орбиты и спина — каждое состояние — будет характеризоваться некоторой определенной общей энергией.

---

* Строго говоря, законы квантовой механики являются универсальными: они применяются к макроскопическим звездным системам так же хорошо, как и к микроскопическим атомам. Тем не менее для макроскопических систем квантовые ограничения, касающиеся орбит, не имеют практического значения в связи с крайне малым расстоянием между разрешенными орбитами. — *Примеч. авт.*

(Признание и анонс: я привожу здесь несколько неаккуратное объяснение, чтобы сразу не обременять вас слишком большим количеством подробностей. Согласно современной квантовой механике, правильным способом является описание состояния частицы в терминах ее волновой функции, которая описывает вероятность ее нахождения в том или ином месте, а не в терминах орбиты, по которой она движется. Мы поговорим об этом подробнее в главе 9. Изображение орбиты представляет собой пережиток так называемой старой квантовой механики. Она полезна в качестве визуализации, но непригодна для точной работы.)

Использование кварков для понимания адронов подобно использованию электронов для понимания атомов. Электроны в атоме могут иметь орбиты различных форм и выстраивать спины в разных направлениях. Таким образом, атом может находиться в разных состояниях и иметь разную энергию. Изучению возможных состояний посвящена обширная тема, известная как атомная спектроскопия. Мы используем ее, чтобы выяснять, из чего состоят далекие звезды, проектировать лазеры и решать многие другие задачи. Поскольку атомная спектроскопия имеет отношение к кварковой модели и чрезвычайно важна сама по себе, давайте обсудим эту тему подробнее.

Горячий газ, как в пламени или в звездной атмосфере, содержит атомы в различных состояниях. Даже в атомах с одинаковыми ядрами и с одним количеством электронов электроны могут находиться на разных орбитах, или их спины могут ориентироваться по-разному. Эти состояния имеют разные энергии. Состояния с высокой энергией могут переходить в состояния с меньшей энергией, что сопровождается излучением света. Поскольку энергия в целом сохраняется, энергия испускаемого фотона, которую выдает его цвет, кодирует разность энергий между начальным и конечным состояниями. Каждый сорт атомов имеет свою особенную палитру. Атомы водорода излучают один набор цветов,

атомы гелия — совершенно другой и т. д. Физики и химики называют этот набор цветов *спектром* атома. Спектр служит в качестве подписи атома и может использоваться для его идентификации. Когда вы пропускаете свет через призму, луч разделяется на различные цвета и спектр буквально напоминает штрихкод.

Спектры, наблюдаемые нами в звездном свете, соответствуют спектрам, наблюдаемым в земном пламени. Поэтому мы можем быть уверены — далекие звезды состоят из того же основного материала, что и обнаруживаемый на Земле. Кроме того, поскольку свету от далеких звезд могут понадобиться миллиарды лет, чтобы добраться до нас, мы можем проверить, соответствуют ли действующие сегодня законы физики тем, которые действовали в далеком прошлом. Полученные до сих пор доказательства говорят о том, что так и есть. (Однако у нас есть веские основания полагать, что в *очень* ранней Вселенной, которую мы не можем непосредственно наблюдать, по крайней мере в обычном свете, действовали совершенно другие законы. Мы обсудим это позже.)

Атомные спектры дают нам множество подробных указаний для создания моделей внутреннего строения атомов. Чтобы считаться достоверной, модель должна предсказывать состояния, чьи различия в энергии соответствуют цветовому образцу, выявленному спектром. Большая часть современной химии принимает форму диалога. Природа говорит спектрами; химики отвечают моделями.

Запомнив вышесказанное, вернемся к кварковой модели адронов. Здесь применяются те же идеи с одним важным уточнением. В атомах разница в энергии между любыми двумя состояниями электронов относительно мала, и влияние, оказываемое этой разностью энергии на общую массу атома, незначительно. Центральная идея кварковой модели заключается в том, что для кварковых «атомов», то есть адронов, разница в энергии между различными состояниями настолько велика, что она сильно влияет на массу.

Применив второй закон Эйнштейна, $m = E / c^2$, мы можем интерпретировать адроны с разными массами как системы кварков с различными орбитальными структурами — разными квантовыми состояниями, которые имеют различную энергию. Другими словами, мы *видим* атомные спектры, но *взвешиваем* спектры адронов. Таким образом, то, что на первый взгляд казалось совершенно разными частицами, теперь оказывается всего лишь различными схемами движения в пределах конкретного кваркового «атома». Используя эту идею, Гелл-Манн и Цвейг показали возможность интерпретации множества различных наблюдаемых адронов в качестве различных состояний нескольких базовых кварковых «атомов».

Пока все просто. За исключением уточнения, введенного вторым законом Эйнштейна, кварковая модель адронов выглядит повторением химии. Однако дьявол кроется в деталях, и чтобы увидеть реальность в кварковой модели, пришлось закрыть глаза на кое-какую чертовщину.

Наиболее крамольным предположением является то, о чем мы уже упоминали, — что допустимы только две структуры: мезон (кварк — антикварк) и барион (три кварка). Это предположение включает в себя, в частности, идею того, что кварки не существуют в качестве отдельных частиц! По некоторой причине вы должны были предположить невозможность существования более простой структуры. Не просто неэффективность или нестабильность, а невозможность. Никто, конечно же, не хотел в это верить, поэтому люди упорно трудились, разбивая протоны и пытаясь обнаружить частицы, которые можно было бы идентифицировать в качестве отдельных кварков. Они тщательно изучали то, что оставалось после столкновения частиц. Нобелевские премии и вечная слава, безусловно, достались бы первооткрывателям. Но увы, Святой Грааль найти не удалось. Не было обнаружено ни одной частицы, которая обладала бы свойствами отдельного кварка. В конечном

итоге эта невозможность нахождения отдельных кварков, как и неспособность изобретателей создать вечный двигатель, была возведена в принцип конфайнмента (Principle of Confinement). Однако явление от этого не стало менее безумным.

Дополнительные сложности вскрылись, когда физики попытались создать детальные модели внутренней структуры мезонов и барионов с использованием кварков, учитывая их массы. В самых успешных моделях казалось, что, когда кварки (или антикварки) находятся близко друг к другу, они едва друг друга замечают. Это слабое взаимодействие между кварками было трудно примирить с закономерностью, заключающейся в том, что при попытке изолировать один кварк — или два — обнаруживалась невозможность это сделать. Если кваркам нет дела друг до друга, когда они находятся на близком расстоянии, почему они возражают против разделения, когда они друг от друга далеко?

Фундаментальная сила, которая *возрастает* с увеличением расстояния, была бы беспрецедентным явлением. И это поставило бы неудобный вопрос. Если силы между кварками могут возрастать с увеличением расстояния, почему же астрология не работает? В конце концов, другие планеты содержат много кварков. Может быть, они могут оказывать большое влияние... Может, и так, но на протяжении многих веков ученые и инженеры очень успешно прогнозировали результаты тонких экспериментов, возводили мосты и создавали микрочипы, игнорируя любое возможное влияние удаленных объектов. Астрология должна стоять на более прочной основе.

Поскольку хорошая научная теория должна объяснять, почему астрология так сильно хромает, лучше бы не существовало сил, возрастающих с расстоянием. Старая пословица «Любовь в разлуке крепнет» может иметь или не иметь отношения к романтике, но для частиц такое поведение является крайне странным.

При разработке программного обеспечения первым отважным пользователям часто предоставляется тестовая бета-версия. Эта версия более или менее работает, но поставляется без каких-либо гарантий. Она содержит ошибки, и в ней присутствуют не все функции. Даже работающие части программы работают неидеально.

Оригинальная кварковая модель представляла собой тестовую физическую теорию. В ней использовались специфические правила. Она оставляла такие основополагающие вопросы, как «можно ли получить изолированный кварк?», без ответа. Хуже всего то, что кварковая модель была неопределенной. В ней отсутствовали точные уравнения для сил, действующих между кварками. В этом отношении она напоминала доньютоновские модели солнечной системы или модели атомов, используемые до Шредингера (для экспертов: даже до Бора). Многие физики, включая самого Гелл-Манна, думали, что кварки могут оказаться полезным вымыслом, вроде эпициклов в старой астрономии или орбиталей старой квантовой теории. Казалось, что кварки могли бы послужить полезной временной мерой в процессе математического описания природы и их не следует воспринимать слишком буквально в качестве элементов реальности.

Кварки 1.0: сквозь ультрастробоскопический наномикроскоп

Теоретические особенности кварков дозрели до пикантных парадоксов в начале 1970-х годов, когда Дж. Фридман, Г. Кендалл, Р. Тейлор и их сотрудники начали по-новому изучать протоны в Стэнфордском линейном ускорителе (SLAC).

Вместо того чтобы сталкивать протоны и изучать то, что остается после столкновения, они фотографировали внутренности

протонов. Я не хочу, чтобы это показалось простым, поскольку это не так. Чтобы заглянуть внутрь протонов, вы должны использовать «свет» с очень короткой длиной волны. В противном случае вы, по сути, пытались бы найти рыбу, анализируя ее влияние на длинные океанские волны. Фотоны, используемые для решения этой задачи, не являются частицами обычного света. Они находятся за пределами спектра ультрафиолетовых или даже рентгеновских лучей. Наномикроскоп, позволяющий изучать структуры объектов, размер которых в миллиард раз меньше размера объектов, изучаемых с помощью обычных оптических микроскопов, требует использования *предельно жестких* гамма-лучей.

Кроме того, внутри протонов все очень быстро движется, поэтому во избежание размытости снимка мы должны обеспечить хорошее временное разрешение. Другими словами, наши фотоны также должны отличаться чрезвычайно коротким временем жизни. Нам нужны вспышки или искры, а не длительная выдержка. Мы говорим о «вспышках», которые длятся 10^{-24} секунды или меньше. Фотоны, которые нам требуются, живут так недолго, что их нельзя наблюдать сами по себе. Вот почему они называются *виртуальными* фотонами. Ультрастробоскоп, который улавливает события длительностью в триллионную триллионной мгновения ока (на самом деле даже меньше), требует использования в высшей степени виртуальных фотонов. Поэтому «снимок» нельзя сделать с помощью проходящего «света», который обеспечивает освещение! Мы должны быть умнее и применять косвенные методы.

На линейном ускорителе в Стэнфорде ученые на самом деле сталкивали электроны с протонами и наблюдали появляющиеся в результате столкновения электроны. Возникающие электроны имеют меньшую энергию и импульс по сравнению с исходными. Поскольку энергия и импульс в целом сохраняются, потерянное

электроном должно было быть унесено виртуальным фотоном и передано протону. Это, как мы уже говорили, часто приводит к тому, что протон сложным образом распадается. Гениальный новый подход, который принес Фридману, Кендаллу и Тейлору Нобелевскую премию, заключался в том, чтобы игнорировать все эти сложности и просто следить за электроном. Другими словами, мы просто движемся вместе с потоком энергии и импульса.

Таким образом, учитывая этот поток, мы можем определить вид виртуального фотона, изучая событие за событием, несмотря на то что мы не можем непосредственно «увидеть» этот фотон. Энергия и импульс виртуального фотона точно соответствуют энергии и импульсу, потерянным электроном. Измеряя вероятность того, что различные виды виртуальных фотонов с различной энергией и импульсами (соответствующими различным времени жизни и длине волны) «встретились с чем-то» и были поглощены, вы можете составить представление о том, что находится внутри протона. Эта процедура аналогична составлению картины внутреннего строения человеческого тела путем изучения того, как поглощаются рентгеновские лучи, хотя детали в данном случае значительно сложнее. Достаточно сказать, что в этом процессе используются очень изощренные методы обработки изображений.

Разумеется, внутренняя структура протонов на самом деле не похожа ни на что из того, что вы когда-либо видели или могли увидеть. Наши глаза не приспособлены (то есть недостаточно развиты) для того, чтобы различать такие маленькие расстояния и временные отрезки, поэтому любое визуальное представление ультрастробонаномикромира должно представлять собой смесь карикатуры, метафоры и обмана. Учитывая это предупреждение, пожалуйста, взгляните сейчас на рис. 6.1. Далее мы его обсудим.

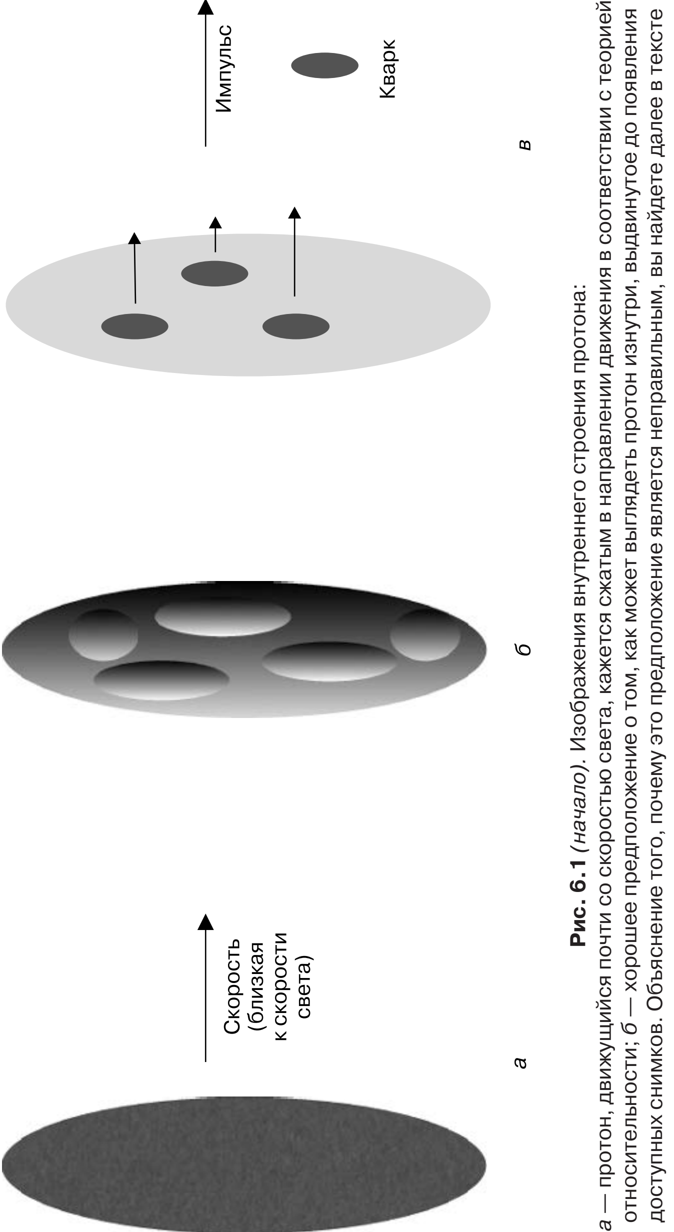


Рис. 6.1 *(начало)*. Изображения внутреннего строения протона:
а — протон, движущийся почти со скоростью света, кажется сжатым в направлении движения в соответствии с теорией относительности; *б* — хорошее предположение о том, как может выглядеть протон изнутри, выдвинутое до появления доступных снимков. Объяснение того, почему это предположение является неправильным, вы найдете далее в тексте

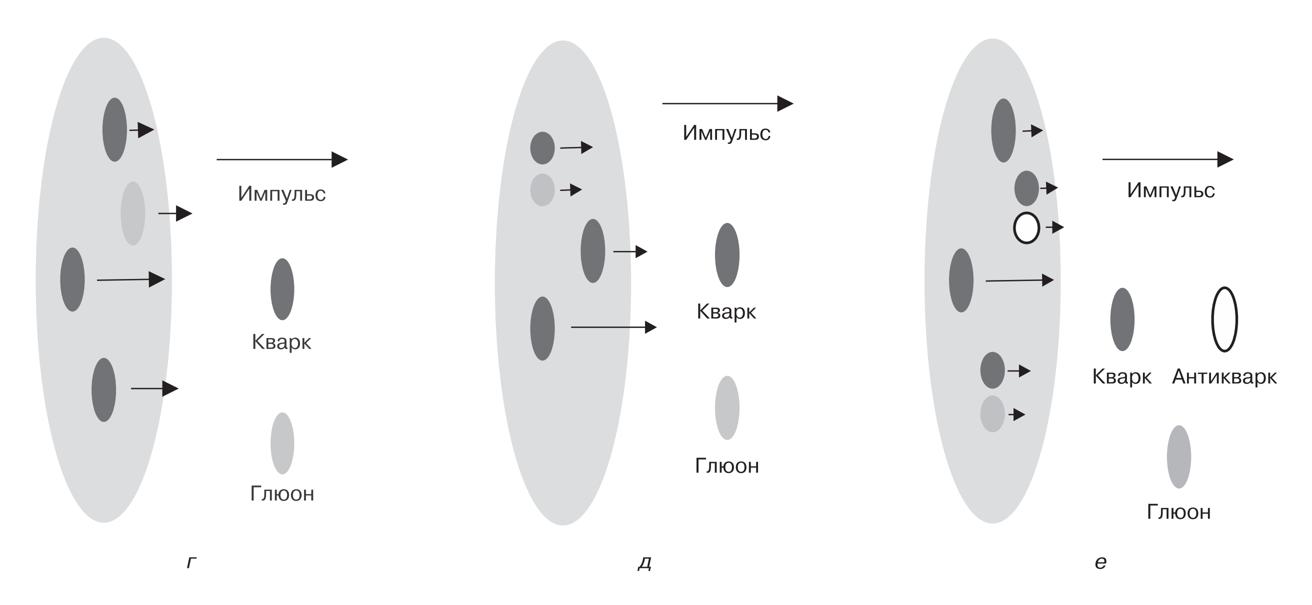


Рис. 6.1 *(продолжение).* Изображения внутреннего строения протона:
в, г — два фактических снимка. Поскольку в квантовой механике доминирует эффект неопределенности, все снимки выглядят по-разному! Внутри протона находятся кварки и глюоны, которые также движутся почти со скоростью света. Они разделяют между собой полную энергию протона, а размер стрелок указывает на их относительные доли.
д, е — при увеличении разрешения можно увидеть больше деталей. Например, вы можете обнаружить, что то, что казалось кварком, оказывается кварком и глюоном, а то, что казалось глюоном, оказывается кварком и антикварком

Представляя эти иллюстрации, я использовал трюк Ричарда Фейнмана. Как мы уже отмечали, внутри протона все движется очень быстро. Чтобы замедлить ход событий, мы представляем себе, что протон движется мимо нас со скоростью, близкой к скорости света. (В главе 9 мы обсудим, как выглядят протоны, если не использовать трюк Фейнмана.) Извне протон выглядит как блин, сплющенный в направлении движения. Это знаменитое сокращение Фицджеральда — Лоренца из специальной теории относительности. Более важным для наших целей является другой известный релятивистский эффект замедления времени. Замедление времени означает, что в быстро движущихся объектах время течет медленнее. Таким образом, то, что находится внутри протонов, кажется практически неподвижным. (Все, что в нем находится, конечно же, разделяет общее движение всего протона.) Эффекты сокращения Фицджеральда — Лоренца и замедления времени были объяснены в сотнях популярных книг по теории относительности, поэтому я не останавливаюсь на них здесь, а просто их использую.

Важно подчеркнуть, что квантовая механика абсолютно необходима для описания даже самых элементарных наблюдений, касающихся внутренней структуры протонов. В частности, нам бросается в глаза неопределенность, которой славится квантовая механика и которая так тревожила Эйнштейна. Если сделать несколько снимков протона при строго идентичных условиях, вы получите разные результаты. Нравится вам это или нет, факты налицо. Самое большее, на что мы можем надеяться, — это на способность предсказать относительные вероятности получения различных результатов.

Это обилие сосуществующих возможностей, как в явлениях, так и в квантовой теории, которая их описывает, бросает вызов традиционной логике. Успех квантовой теории в описании реальности превосходит и в некотором смысле сбрасывает с пьедестала класси-

ческую логику, где одни суждения считаются истинными, а другие —неизбежно ложными. Однако это является примером творческого разрушения, которое дает возможность построить что-то новое. Например, позволяет примирить две, казалось бы, противоречивые идеи о том, что собой представляют протоны. С одной стороны, внутри протона все находится в постоянном движении. С другой — все протоны всегда и везде ведут себя одинаково (то есть каждый протон дает одни и те же вероятности!). Если протон в некоторый момент времени отличается от самого себя в другой момент времени, как все протоны могут быть одинаковыми?

Вот как. Каждое отдельное возможное состояние внутренней структуры протона А со временем преобразуется в другое состояние, скажем, В. Однако в это же время некоторое состояние С преобразуется в А. Таким образом, состояние А по-прежнему существует: новая копия заменяет старую. И в более общем смысле, несмотря на изменение каждого отдельного состояния, в целом их распределение остается неизменным. Это похоже на спокойно текущую реку, которая всегда выглядит одинаково, несмотря на то что каждая ее капля постоянно изменяется. Мы глубже погрузимся в эту реку в главе 9.

Партоны

Снимки, сделанные Фридманом и его сотрудниками, содержали как откровение, так и загадку. На этих снимках внутри протонов можно было различить некие сущности, очень маленькие субчастицы. Фейнман, который отвечал за большую часть процесса обработки изображений, назвал эти внутренние объекты партонами (от слова part — *часть* протона). Это злило Мюррея Гелл-Манна, как я узнал на собственном опыте, когда впервые его встретил. Он спросил меня, над чем я работаю. Я сделал ошибку, сказав, что пытаюсь улучшить партонную модель.

Я слышал, что исповедь полезна для души, поэтому здесь я признаюсь, что упомянул о партонах не по незнанию. Мне было интересно посмотреть, как Гелл-Манн отреагирует на идиому своего соперника. Как писал Измаил о своей первой встрече с капитаном Ахавом, реальность превзошла ожидания.

Гелл-Манн посмотрел на меня вопросительно. «Партоны?» Пауза, выражение глубокой концентрации на лице. «Партоны?! Что такое партоны?» Затем он снова сделал паузу и задумался, после чего его лицо просветлело: «О, вы, должно быть, имеете в виду те штуки, о которых говорит Дик Фейнман! Частицы, которые не подчиняются квантовой теории поля. Нет такого понятия. Это просто кварки. Не следует позволять Фейнману загрязнять язык науки своими шутками». Наконец, он спросил авторитетным тоном: «Не имеете ли вы в виду кварки?»

Некоторые сущности, выявленные Фридманом и его сотрудниками, действительно были похожи на кварки. Они отличались странным дробным электрическим зарядом и точным спиновым числом, которыми должны были обладать кварки. Однако протоны также содержат другие фрагменты, не похожие на кварки. Позднее они были интерпретированы как цветные глюоны. Поэтому и Гелл-Манн, и Фейнман были правы: внутри протона есть кварки и кое-что еще.

Слишком просто

В моей альма-матер, Чикагском университете, продаются толстовки, на которых написано:

«Это работает на **практике***, а как насчет* **теории***?»*

Как кварки Гелл-Манна, так и партоны Фейнмана имели раздражающую особенность, которая выражалась в том, что они хорошо работали на практике, но не в теории.

Мы уже обсуждали, как кварковая модель помогла организовать зоопарк адронов, правда, с помощью безумных правил. Партонная модель использовала другие безумные правила, но на этот раз для интерпретации изображений внутренней структуры протона. Правила партонной модели очень просты: для выполнения расчетов вы должны предположить, что фрагменты внутри протона — кварки, партоны, называйте как угодно — не имеют *никакой* внутренней структуры и *не* взаимодействуют друг с другом. Разумеется, они взаимодействуют с другими фрагментами, в противном случае протоны бы просто разлетелись. Однако идея партонной модели заключается в хорошем приблизительном описании того, что происходит за очень короткий промежуток времени на очень коротких расстояниях, без учета взаимодействия. И именно для получения доступа к этим коротким временным промежуткам и коротким расстояниям используется ультрастробоскопический наномикроскоп SLAC. Таким образом, партонная модель говорит о том, что с помощью этого инструмента вы должны получить четкое видение внутреннего строения протона, что и происходит на самом деле. Кроме того, вы должны увидеть и другие базовые строительные блоки, если таковые имеются, и это тоже происходит.

Все это звучит очень разумно, почти интуитивно очевидно — ничего особенного не может произойти за крайне короткий промежуток времени в очень маленьком объеме. Что в этом безумного?

Проблема в том, что, когда вы добираетесь до очень малых расстояний и очень коротких временных промежутков, в игру вступает квантовая механика. Когда вы принимаете во внимание квантовую механику, то «разумное, почти интуитивно очевидное» ожидание того, что в течение короткого времени в небольшом объеме ничего особенного произойти не может, начинает казаться весьма наивным.

Чтобы понять это, не вдаваясь слишком глубоко в подробности, рассмотрим принципы неопределенности Гейзенберга. Согласно первоначальному принципу неопределенности, чтобы точно определить положение, мы должны смириться с невозможностью точного определения импульса. Внести дополнение в первоначальный принцип неопределенности Гейзенберга потребовала теория относительности, которая связывает пространство со временем и импульс с энергией. Этот дополнительный принцип говорит о том, что для точного определения времени мы должны смириться со значительной неопределенностью в плане энергии. Сочетая эти два принципа, мы обнаруживаем, что для фиксации коротких временных промежутков с высоким разрешением мы должны смириться с плавающими показателями суммарного импульса и энергии.

Как ни странно, основная методика в экспериментах Фридмана — Кендалла — Тейлора, что мы уже отмечали, заключалась именно в измерении энергии и импульса. Однако здесь нет никакого противоречия. Наоборот, их техника является прекрасным примером использования принципа неопределенности Гейзенберга для достижения определенности. Дело в том, что для получения изображения пространства-времени с высоким разрешением вы можете — и должны — объединить результаты *многих* столкновений с различными показателями энергии и импульса, переданных протону. Затем в процессе обработки изображений принцип неопределенности, по сути, применяется в обратном направлении. Вы производите тщательно продуманную выборку результатов при различных энергиях и импульсах, чтобы извлечь точные позиции и показатели времени. (Для экспертов: вы делаете преобразования Фурье.)

Поскольку для получения четкого изображения вам необходимо допустить большой разброс показателей энергии и импульса, вы должны, в частности, предусмотреть возможность получения

больших значений. При больших значениях энергии и импульса вы можете получить доступ ко многим «вещам», например к множеству частиц и античастиц. Эти *виртуальные* частицы возникают и исчезают очень быстро, не перемещаясь далеко. Помните, что мы столкнулись с ними только в процессе фиксации коротких временных промежутков с высоким разрешением! Мы не увидим их в обычном смысле, если не обеспечим энергию и импульс, необходимые для их создания. И даже тогда то, что мы видим, представляет собой не исходные нетронутые виртуальные частицы — такие, которые появляются и исчезают спонтанно, а реальные частицы, которые мы можем использовать для воссоздания исходных виртуальных частиц в процессе обработки изображений.

Вирусы могут ожить только благодаря более сложным организмам. Виртуальные частицы являются еще более иллюзорными, поскольку для их *возникновения* требуется помощь извне. Тем не менее они присутствуют в наших квантово-механических уравнениях, и в соответствии с этими уравнениями виртуальные частицы влияют на поведение частиц, которые мы можем видеть.

Казалось разумным ожидать того, что виртуальные частицы будут оказывать сильное влияние тогда, когда мы имеем дело с сильно взаимодействующими между собой частицами, вроде тех, которые составляют протоны. Ученые, занимающиеся квантовой механикой, ожидали, что чем глубже и быстрее заглядывать внутрь протонов, тем больше виртуальных частиц и сложных структур можно увидеть. И поэтому подход Фридмана — Кендалла — Тейлора не казался таким уж перспективным. Снимок, сделанный с помощью ультрастробоскопического наномикроскопа, представлял бы собой расплывчатое пятно*.

* На самом деле у очень немногих чрезвычайно умных экспертов по квантовой механике, прежде всего у Джеймса Бьеркена, были еще более изощренные аргументы, говорящие о том, что этот подход мог в конце концов сработать. — *Примеч. авт.*

Однако он не был расплывчатым пятном. На нем были различимы приводящие ученых в ярость партоны. Известный мудрый совет Эйнштейна гласит: «Сделайте все так просто, как только возможно, но не проще». Партоны представляли собой слишком простую концепцию.

Асимптотическая свобода (заряд без заряда)

Давайте представим, что мы — виртуальные частицы. Возникнув, мы должны решить, что делать в течение своей очень короткой жизни. (Это не так уж и трудно себе представить.) Мы оцениваем обстановку. Предположим, что неподалеку есть положительно заряженная частица. Если мы заряжены отрицательно, мы находим эту частицу привлекательной и пытаемся прижаться к ней. Если мы положительно заряжены, то мы находим другую частицу отталкивающей, воспринимаем как соперника или угрозу и отходим. (Ни того ни другого не происходит.)

Отдельные виртуальные частицы возникают и исчезают, но вместе они превращают сущность, которую мы называем пустым пространством, в динамическую среду. Из-за поведения виртуальных частиц реальный положительный заряд частично *экранируется*. То есть положительный заряд обычно окружен облаком компенсирующих отрицательных зарядов, которые находят его привлекательным. Издалека мы не чувствуем полную силу положительного заряда, поскольку эта сила частично отменяется отрицательным облаком*. Другими словами, эффективный заряд увеличивается по мере приближения и уменьшается по мере удаления. Эта ситуация изображена на рис. 6.2.

* Таким образом, по мере удаления сила уменьшается быстрее, чем в отсутствие эффекта экранирования. — *Примеч. авт.*

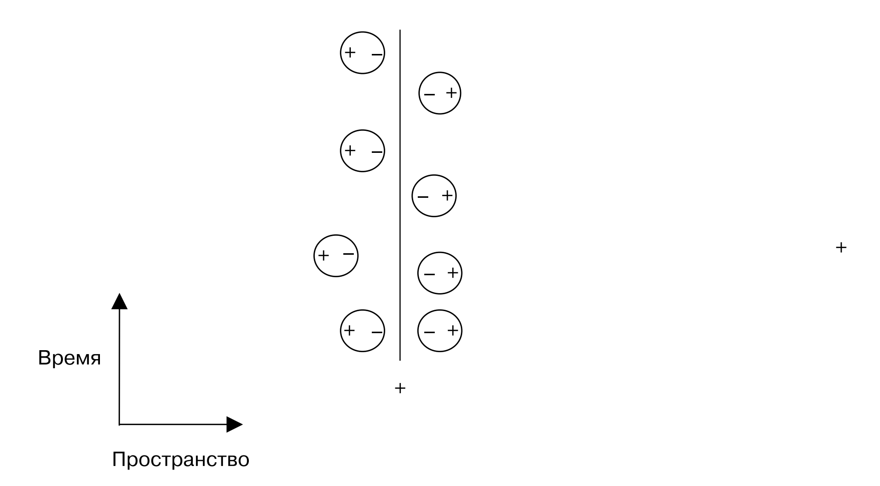


Рис. 6.2. Экранирование заряда виртуальными частицами. Центральная линия показывает положительно заряженную реальную частицу, зафиксированную в пространстве, — она движется вдоль вертикальной линии по мере прохождения времени. Эта реальная частица окружена виртуальными парами частиц — античастиц, которые возникают в случайные моменты времени, ненадолго разделяются и исчезают. Положительный заряд реальной частицы притягивает отрицательно заряженный элемент каждой виртуальной пары и отталкивает положительный элемент. Таким образом, реальная частица окружается и ее положительный заряд частично экранируется отрицательно заряженным облаком виртуальных частиц. Издалека мы наблюдаем меньший эффективный заряд, поскольку отрицательное виртуальное облако частично отменяет центральный положительный заряд

Это поведение прямо *противоположно* тому, которого мы ожидаем от кварков в кварковой модели или от партонов в партонной модели. Предполагается, что кварки в кварковой модели слабо взаимодействуют друг с другом на близком расстоянии. Однако если их эффективный заряд является наибольшим в непосредственной близости, то мы обнаружим нечто совершенно противоположное. Они будут наиболее сильно взаимодействовать друг с другом, когда находятся близко друг к другу, и слабее, когда они находятся друг от друга далеко и их заряды экранированы. Партоны в партонной модели при ближайшем рассмотрении должны выглядеть как простые отдельные частицы. Но если каждый

партон обволакивает густое облако виртуальных частиц, вместо этого мы увидим те самые облака.

Очевидно, мы подошли бы гораздо ближе к описанию кварков, если бы смогли обеспечить эффект, противоположный экранированию, — создать облака, которые усиливают центральный заряд, а не отменяют его. Благодаря такому *антиэкранированию* мы могли иметь силы слабые на близком расстоянии, но возрастающие по мере удаления благодаря облакам. Электрический заряд экранируется, а не антиэкранируется, поэтому подходящую модель нам нужно искать в другом месте. Мы, конечно же, найдем ее, в противном случае я бы не поднял данную тему. Просто для того, чтобы мы могли говорить об этом, давайте временно называть гипотетическую антиэкранированную вещь *зорядом*. (Мы обнаружим, что обобщенный вид заряда, цветной заряд, ведет себя как зоряд.)

Если облака виртуальных частиц антиэкранируют зоряд, то сила реального, центрального зоряда увеличивается по мере удаления. Вы можете получить мощные силы на больших расстояниях из небольшого центрального зоряда, поскольку окружающие виртуальные частицы увеличивают его влияние. Таким образом, если кварки имеют зоряд вместо электрического заряда или в дополнение к нему, вы можете получить кварки, которые слабо взаимодействуют друг с другом на близком расстоянии, как предусмотрено кварковой моделью, и сильно взаимодействуют между собой, находясь друг от друга далеко. Вы даже можете сделать это, не прибегая к астрологии, как я объясню далее. Кроме того, вы можете получить партоны, не скрытые плотными облаками, поскольку их обусловленная облаком сила — их эффективный зоряд — убывает в непосредственной близости от них.

А что можно сказать по поводу неограниченного возрастания силы с увеличением расстояния, которое угрожало восстановить репутацию астрологии? Это возрастание является результатом, который мы получаем для изолированной зоряженной частицы.

Однако большое облако имеет свою цену. (Можно сказать, что расширяющиеся облака стоят очень дорого.) Для создания такого возмущения требуется энергия, и вам понадобилось бы бесконечное количество энергии, чтобы обеспечить его поддержание на бесконечном расстоянии. Поскольку доступная энергия конечна, Природа не позволит нам создать изолированную зоряженную частицу. С другой стороны, мы *можем* иметь систему зоряженных частиц, в которой зоряды, например, компенсируют друг друга, или еще проще — зоряженную частицу и античастицу. Виртуальные частицы, которые находятся далеко от зоряда и отменяющего его антизоряда, не почувствуют какого-либо притяжения, и поэтому образование облаков не будет продолжаться. Это начинает все менее походить на оправдание астрологии и все больше на оправдание дьявольских правил кварковой модели! Одна и та же умная идея позволяет нам устранить все влияния, действующие на дальнем расстоянии, и удержать целые классы частиц.

Антиэкранирование — это ужасное слово. Стандартный, использующийся в области физики термин «*асимптотическая свобода*» не намного лучше*. Идея заключается в том, что по мере сокращения расстояния эффективный цветной внутренний заряд все больше приближается к нулю, но никогда его не достигает. Нулевой цветной заряд означает полную свободу — никакое влияние не оказывается и не ощущается. Эта степень свободы увеличивается, как говорят математики, асимптотически.

Как бы вы ее ни называли, асимптотическая свобода является перспективной идеей для описания кварков и оправдания концепции

---

* Когда Гросс и я открыли асимптотическую свободу, мы были молоды и наивны и не в полной мере понимали важность выбора запоминающегося названия. Если бы мне пришлось делать это снова, то вместо «асимптотической свободы» я использовал бы что-то цепляющее, например «заряд без заряда». Термин «асимптотическая свобода» был предложен моим хорошим другом Сидни Коулманом, которого я прощаю. — *Примеч. авт.*

партонов. Мы хотели бы иметь теорию с асимптотической свободой, которая согласуется с основными принципами физики. Но существует ли такая теория?

Правила квантовой механики и специальной теории относительности являются настолько жесткими и мощными, что создать теорию, которая подчинялась бы обеим, очень сложно. Те, которые им соответствуют, носят название релятивистской квантовой теории поля. Поскольку мы знаем лишь несколько основных способов построения релятивистской квантовой теории поля, мы можем изучить все возможности, чтобы выяснить, обеспечивает ли какая-то из них асимптотическую свободу.

Необходимые расчеты выполнить нелегко, но возможно*. Следствием этой работы стало то, что каждый ученый надеется найти в результате научного исследования, но редко находит: ясный, уникальный ответ. Почти все релятивистские квантовые теории поля подразумевают экранирование. Это интуитивно очевидное, «разумное» поведение на самом деле почти неизбежно. Но не совсем. Существует небольшой класс асимптотически свободных теорий (с антиэкранированием). В своей основе все они подразумевают наличие обобщенных зарядов, введенных Янгом и Миллом. В этом небольшом классе асимптотически свободных теорий существует только одна, которая, похоже, может описать реальные кварки (и глюоны). Эта теория называется квантовой хромодинамикой или КХД.

Как я уже говорил, КХД подобна квантовой версии электродинамики — квантовой электродинамике, или КЭД, на стероидах. Она содержит в себе очень много симметрии. Для базового понимания КХД нам нужно разобраться в некоторых глубинных основах, используя понятие симметрии, и затем мы построим свое описание этой теории с помощью рисунков и аналогий.

---

* В 1973 году это было гораздо сложнее, чем сегодня, поскольку с тех пор техника выполнения расчетов была значительно усовершенствована. — *Примеч. авт.*

Самая большая проблема может заключаться в представлении того, как связать все эти абстракции и метафоры с чем-либо реальным и конкретным. Чтобы размять воображение, давайте рассмотрим *фотографию* того, чего не существует. На рис. 6.3 изображены кварк, антикварк и глюон.

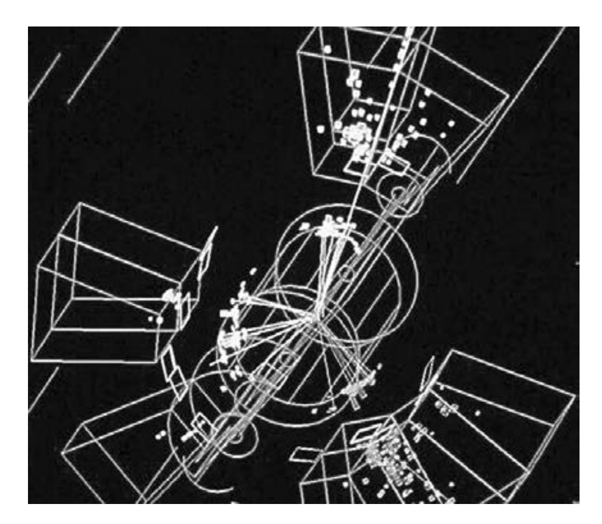


Рис. 6.3. Эта фотография сделана на Большом электрон-позитронном коллайдере (БЭПК), который работал в ЦЕРНе, близ Женевы, в 1990-е годы. Потоки частиц, или струи, возникающие в результате этого столкновения, ведут себя в соответствии с теоретическими предсказаниями для кварка, антикварка и глюона. Струи позволяют получить удобные для работы сведения об объектах, которые нельзя наблюдать как частицы в обычном смысле

Кварки и глюоны 2.0: верить — значит видеть

Разумеется, камера не создает снимки с подписями «кварк, антикварк, глюон». Полученное изображение нуждается в некоторой интерпретации.

Во-первых, давайте проанализируем изображенные объекты, используя повседневный язык. Мы видим сложные очертания

магнитов и других компонентов ускорителя и детектора. Вы можете различить тонкую трубку, проходящую через середину. Это канал ускорителя, по которому движутся электроны и позитроны. На этом изображении показана лишь небольшая часть, соответствующая нескольким метрам машины БЭПК, заполняющей круговой тоннель длиной 27 километров. (Кстати, в том же самом туннеле теперь размещается Большой адронный коллайдер (БАК)*, в котором вместо электронов и позитронов используются протоны и который работает на более высоких энергиях. В следующих главах мы поговорим о БАК подробнее.) Пучки электронов и позитронов, циркулирующих в противоположных направлениях, разгоняются до огромных энергий так, что их скорость практически достигает скорости света. Два луча пересекаются в нескольких точках, и там происходят столкновения. Эти особые точки окружены большими детекторами, которые способны отслеживать «искры» и фиксировать тепло, возникающее в результате столкновения частиц. Линии на изображении представляют собой следы частиц, а точки с внешней стороны говорят о количестве тепла.

Следующим шагом является перевод описания увиденного с языка поверхностного представления на язык глубинной структуры. Этот перевод подразумевает совершение концептуального шага, подобного скачку веры**. Прежде чем совершить этот скачок, давайте укрепим нашу веру.

Отец Джеймс Малли познакомил меня с самым глубоким и ценным принципом научного метода. (Данный принцип имеет и множество других применений.) Он сказал, что узнал его в семинарии, где тот назывался кредо иезуитов. Это принцип гласит:

«Блаженнее просить прощения, чем разрешения».

---

* БЭПК был демонтирован в 2002 году для освобождения туннеля под строительство БАК. — *Примеч. науч. ред.*

** Это не квантовый скачок. Квантовые скачки очень малы. — *Примеч. авт.*

Я интуитивно следовал этому принципу на протяжении многих лет, не зная о том, что его одобряет церковь. Теперь я использую его на более систематической основе и с чистой совестью.

В теоретической физике кредо иезуитов замечательно взаимодействует с принципом Эйнштейна: «Сделайте все так просто, как только возможно, но не проще». Вместе они говорят нам о том, что мы должны делать самые радужные предположения относительно простоты вещей*. При получении отрицательного результата мы всегда можем попросить прощения и попробовать еще раз, не тратя времени на получение разрешения.

Принимая это во внимание, давайте выскажем простейшее предположение: как учесть то, что получается в результате столкновений, основываясь на наших представлениях о глубинной структуре физического мира. Согласно теории квантовой электродинамики (КЭД), электрон и его античастица, позитрон, могут аннигилировать друг с другом, произведя виртуальный фотон. Виртуальный фотон, в свою очередь, может превратиться в кварк и антикварк. Так гласит КЭД. Этот базовый процесс изображен на рис. 6.4.

В этот момент ситуация становится рискованной, поскольку, как мы уже обсуждали, кварк (и антикварк) не могут существовать в изоляции. Они должны удерживаться внутри адронов. Процесс наращивания облака виртуальных частиц и нейтрализации цветных зарядов, ведущий от кварков к адронам, может быть очень сложным. Эти сложности могут затруднить идентификацию признаков исходных кварка и антикварка, подобно тому как, глядя на последствия камнепада, бывает сложно понять, из-за какого камня он начался. Однако давайте попробуем разобраться в этом в духе кредо иезуитов, надеясь на лучшее.

Первоначальные кварк и антикварк, которые возникают в результате столкновения, имеют огромную энергию и движутся

---

* Разумеется, «просто» — это сложное понятие. См. главу 12. — *Примеч. авт.*

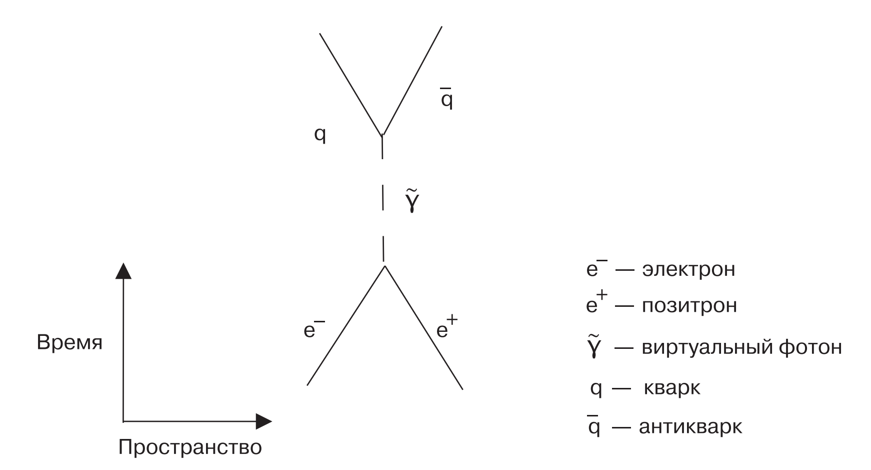


Рис. 6.4. Пространственно-временная диаграмма базового процесса, в котором электрон и позитрон аннигилируют, образуя виртуальный фотон, который затем материализует пару «кварк — антикварк»

в противоположных направлениях*. Теперь предположим, что формирование облака и нейтрализация цветового заряда обычно осуществляется плавно, путем создания и переупорядочения цветных зарядов без особых нарушений общего потока энергии и импульса. Мы называем этот вид создания частиц без существенного изменения в общем потоке мягким излучением. После этого мы увидели бы два роя частиц, движущихся в противоположных направлениях, каждый из которых унаследовал бы суммарную энергию и импульс породившего его кварка или антикварка. И это именно то, что мы наблюдаем в большинстве случаев. Типичная картина изображена на рис. 6.5.

* Это происходит благодаря сохранению суммарного импульса. Изначально он был равен нулю, поскольку электроны и позитроны двигались с одной и той же скоростью в противоположных направлениях. Таким образом, в конце, в момент наблюдения, он по-прежнему должен быть равен нулю. Конечно, в принципе, мы могли бы экспериментально обнаружить, что импульс не сохраняется, однако тогда нам пришлось бы вернуться назад и переучить все основы физики. — *Примеч. авт.*

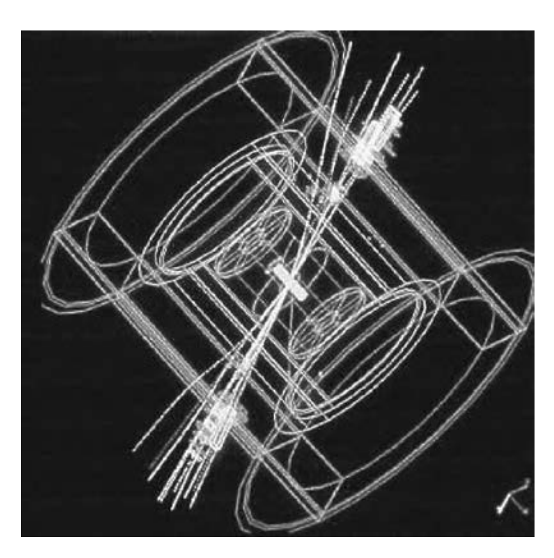


Рис. 6.5. Двухструйный процесс, который мы интерпретируем как материализацию кварка и антикварка

Время от времени мы также наблюдаем жесткое излучение, которое оказывает влияние на общий поток. Кварк или антикварк может излучить глюон. Тогда мы увидим три струи вместо двух. На БЭПК это происходит примерно в 10 % столкновений. Приблизительно в 10 % от 10 % событий, то есть в 1 %, мы наблюдаем четыре струи и т. д.

Теоретическая интерпретация наших иллюстраций схематически приведена на рис. 6.6.

При такой интерпретации мы можем совместить несовместимое в том, что касается кварков. Несмотря на невозможность наблюдения изолированных кварков, мы можем видеть их благодаря потокам, которые они индуцируют. В частности, мы можем проверить, соответствуют ли вероятности получения различного количества струй, выходящих под разными углами и по-разному разделяющих суммарную энергию, вероятностям, вычисляемым для кварков, антикварков и глюонов с помощью теории квантовой хромодинамики (КХД).

На БЭПК были произведены сотни миллионов столкновений, поэтому мы можем провести точное и детальное сравнение теоретических предсказаний и экспериментальных результатов.

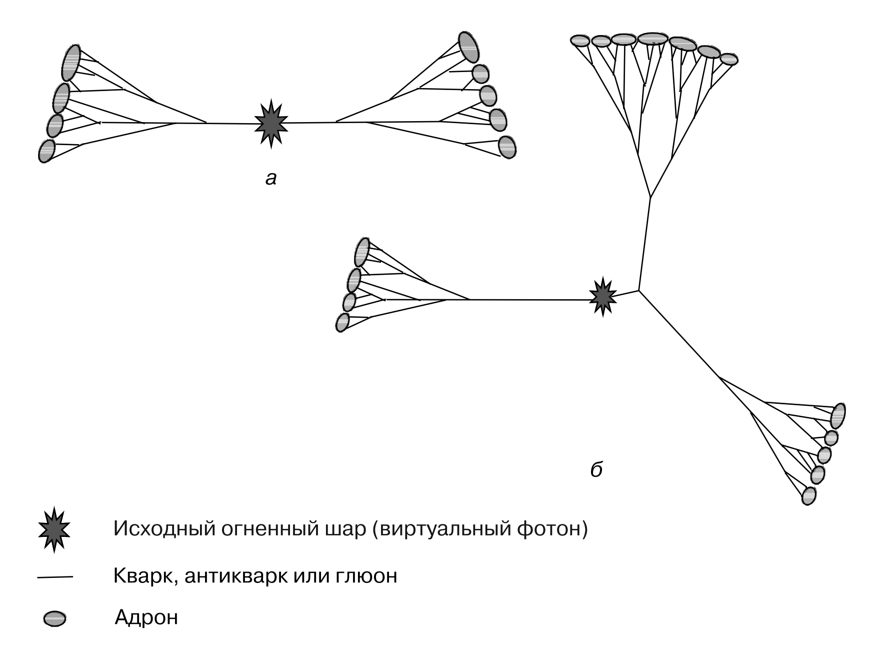


Рис. 6.6. Схема излучения: *а* — как мягкое излучение создает струи адронов из кварка и антикварка; *б* — как жесткое излучение глюона, за которым следует большое количество мягкого излучения, производит три струи

Это работает. И именно поэтому я с полной уверенностью могу сказать, что объекты, которые вы видите на рис. 6.3, — это кварк, антикварк и глюон. Тем не менее, чтобы увидеть эти частицы, мы должны были расширить наши представления о том, что значит видеть что-либо, а также о том, что такое частица.

Давайте доведем рассмотрение наших изображений кварков/глюонов до логического завершения, соединив его с двумя мощными идеями — асимптотической свободой и квантовой механикой.

Между наблюдаемыми в виде струй кварками и глюонами и асимптотической свободой существует прямая связь. Ее легко

объяснить с помощью преобразований Фурье, но, к сожалению, сами преобразования Фурье не так легко объяснить, поэтому мы не пойдем этим путем. Далее приведено объяснение, которое является менее точным, но требует большей фантазии (и меньшей подготовки).

Чтобы объяснить, почему кварки и глюоны появляются (только) в виде струй, мы должны объяснить, почему мягкое излучение является частым явлением, а жесткое излучение — редким. Асимптотическая свобода подразумевает две центральные идеи. Во-первых, цветной заряд, присущий элементарной частице — будь то кварк, антикварк или глюон, — является небольшим и не очень мощным. Во-вторых, облако виртуальных частиц, окружающее элементарную частицу, является разреженным вблизи от нее, но сгущается по мере удаления. Это окружающее облако увеличивает фундаментальную силу частицы. Именно окружающее облако, а не основной заряд частицы делает сильное взаимодействие сильным.

Излучение имеет место, когда частица выходит из равновесия со своим облаком. Тогда переупорядочение, которое восстанавливает равновесие в цветных полях, вызывает излучение глюонов или пар «кварк — антикварк», подобно тому как переупорядочение в атмосферных электрических полях вызывает молнии, а переупорядочение в тектонических плитах — землетрясения и извержения вулканов. Как кварк (антикварк или глюон) выходит из равновесия со своим облаком? Одним из вариантов может быть его внезапное выскакивание из виртуального фотона, как это происходило в экспериментах на БЭПК, которые мы обсуждали. Для достижения равновесия вновь образованный кварк должен нарастить свое облако, начиная от центра, где этот процесс инициируется его небольшим цветным зарядом. Соответствующие изменения невелики и постепенны, поэтому они производят лишь небольшие потоки энергии и импульса, то есть мягкое излучение. По-другому кварк может выйти из равновесия со своим облаком, если он будет вытолкнут

квантовыми флуктуациями глюонных полей. Жесткое выталкивание может породить жесткое излучение. Однако поскольку присущий кварку цветной заряд мал, реакция кварка на квантовые флуктуации в глюонных полях часто бывает ограниченной, и поэтому жесткое излучение наблюдается редко. Вот почему более вероятно возникновение двух, а не трех струй.

Связь наших фотографий с основами квантовой механики является еще более очевидной и не требует такого сложного объяснения. Мы в очередной раз обнаруживаем, что многократное повторение одного и того же действия каждый раз дает разные результаты. Мы видели это и раньше при работе с ультрастробоскопическим наномикроскопом, который делает снимки протонов; мы видим это, работая с машиной творческого разрушения, которая делает снимки пустого пространства. Если бы мир вел себя классически и предсказуемо, то, несмотря на вложенный миллиард евро, БЭПК представлял бы собой очень скучную машину: каждое столкновение просто воспроизводило бы результат первого, и у нас была бы лишь одна фотография для изучения. Вместо этого наши квантовые теории предсказывают, что одна и та же причина может порождать разные результаты. И мы находим этому подтверждения. Мы можем предсказать относительные вероятности для различных результатов. Основываясь на многократных повторениях, мы способны детально проверить эти предсказания. Таким образом, мы можем справиться с краткосрочной непредсказуемостью. А последняя, в конце концов, полностью совместима с долгосрочной предсказуемостью.

Глава 7. Симметрия: отличия без различий

Основной идеей квантовой хромодинамики является симметрия. «Симметрия» — это общеупотребительное слово, и его смысл, как и смысл других подобных слов, является не вполне однозначным. Симметрия может означать баланс, приятные пропорции, регулярность. В математике и физике значение этого слова согласуется со всеми этими идеями, но является более четким.

Мне нравится определение, согласно которому *симметрия означает, что у вас есть отличие без различия*.

Юристы тоже используют фразу «отличие без различия». В этом контексте она обычно означает выражение того же самого, но другими словами. Вот пример от комика Алана Кинга:

> *«Мой адвокат предупредил меня, что если я умру, не выразив свою последнюю волю, то я умру, не оставив завещания».*

Для понимания математической концепции симметрии рассмотрим пример. Мы можем построить симпатичную маленькую башню примеров, содержащую наиболее важные идеи в легко усваиваемой форме, в мире треугольников (рис. 7.1).

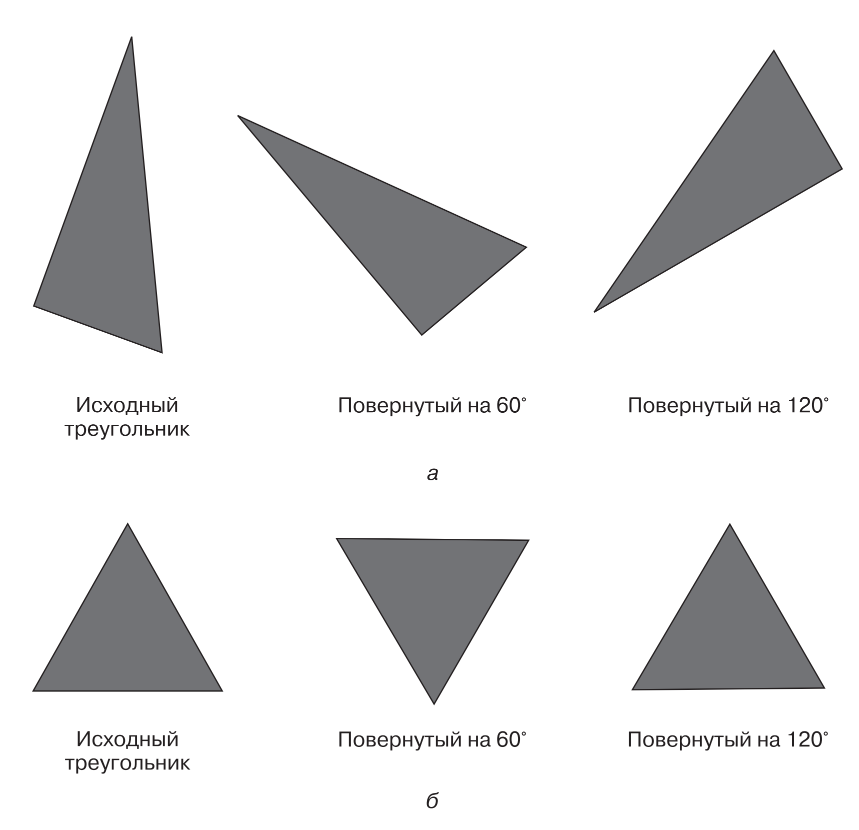


Рис. 7.1. Простой пример симметрии: *а* — вы не можете перевернуть неравносторонний треугольник, не изменив его; *б* — если вы повернете равносторонний треугольник на 120° вокруг его центра, он не изменится

Вы не можете перевернуть большинство треугольников, не изменив их (см. рис. 7.1, *а*). Тем не менее равносторонние треугольники являются особенными. Вы можете повернуть равносторонний треугольник на 120 или 240° (то есть дважды), получив при этом ту же самую форму (см. рис. 7.1, *б*). Равносторонний треугольник обладает нетривиальной симметрией, поскольку она допускает *отличия* (между треугольником и его повернуты-

ми версиями), которые, в конце концов, не создают каких-либо *различий* (повернутые варианты имеют ту же форму). И наоборот, если кто-то говорит вам, что треугольник выглядит так же, будучи повернутым на 120°, вы можете сделать вывод о том, что этот треугольник является равносторонним (или что человек лжет).

Следующий уровень сложности проявляется тогда, когда мы рассматриваем набор треугольников с разными видами сторон (рис. 7.2). Конечно, если мы повернем один из них на 120°, мы не получим тот же треугольник — стороны не будут совпадать. На рис. 7.2 первый треугольник (RBG) поворачивается, превращаясь во второй треугольник (BGR), второй поворачивается, превращаясь в третий (GRB), а третий поворачивается, превращаясь в первый. Однако полный *набор*, содержащий *все три треугольника, не изменяется**.

С другой стороны, если кто-то говорит вам, что треугольник с тремя различными видами сторон наряду с некоторыми другими вещами выглядит по-прежнему после поворота на 120°, вы можете сделать вывод о том, что треугольник равносторонний, *а также* о том, что существует два равносторонних треугольника с различным расположением сторон (или о том, что человек лжет).

Давайте добавим последний слой сложности. Вместо треугольников со сторонами разных цветов рассмотрим законы, связанные с этими треугольниками. Например, простой закон может заключаться в том, что при сжатии треугольника он аккуратно сворачивается так, что его стороны искривляются. Теперь предположим, что мы

---

* В этом примере вы должны проигнорировать факт нахождения трех треугольников в разных местах. Если это вас смущает, вы можете представить, что они являются бесконечно тонкими треугольниками, размещенными друг на друге. — *Примеч. авт.*

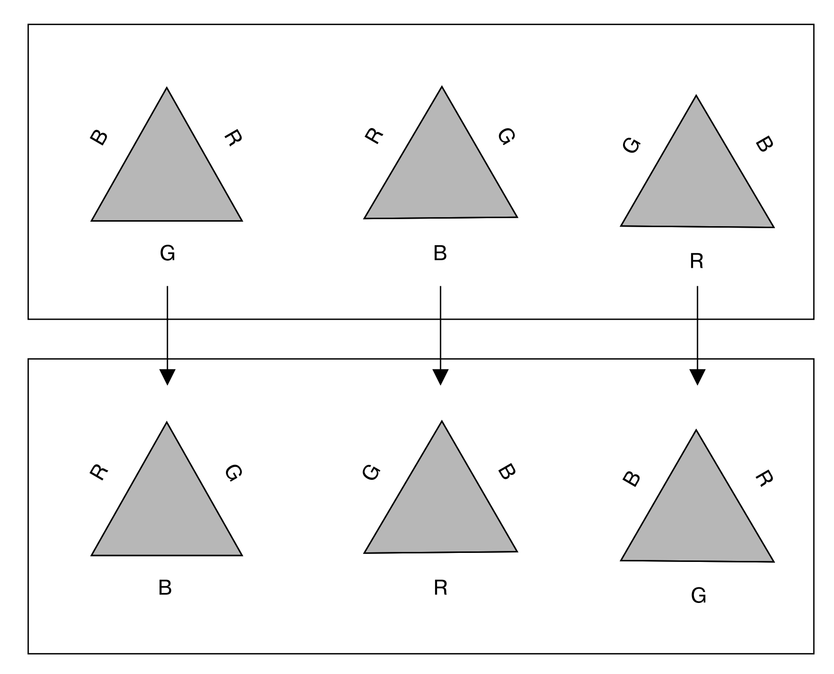


Рис. 7.2. Более сложный пример симметрии. Равносторонние треугольники без различных «цветных» сторон (здесь цвета обозначаются так: R(ed) — красный, B(lue) — синий, G(reen) — зеленый) изменяются при поворотах на 120°; однако весь набор из трех треугольников возвращается в исходное состояние

исследовали только треугольники RBG, так что мы действительно вывели закон сжатия только для этих треугольников. Если мы знаем, что вращение на 120° обеспечивает отличие без различий, то есть поворот на 120° определяет симметрию в математическом смысле, то мы можем сделать вывод не только о существовании других видов треугольников, но и том, что они тоже аккуратно сворачиваются при сжатии.

Эта серия примеров на простых формах демонстрирует мощь симметрии. Если мы знаем, что объект обладает симметрией, мы можем сделать вывод относительно некоторых его свойств. Если мы знаем, что набор объектов обладает симметрией, то на

основании знания одного объекта мы можем сделать вывод о существовании и свойствах других. И если мы знаем, что законы природы обладают симметрией, то на основании знаний об одном объекте мы можем сделать вывод о существовании, свойствах и поведении новых объектов.

В современной физике симметрия позволяет предсказывать существование новых форм материи и формулировать новые, более всеобъемлющие законы. Например, специальную теорию относительности можно рассматривать в качестве постулата симметрии. Она говорит нам о том, что уравнения физики должны выглядеть по-прежнему, если мы преобразуем все объекты в этих уравнениях, добавив постоянную величину к их скоростям. Эта величина переносит один мир в другой, движущийся относительно него с постоянной скоростью. Специальная теория относительности говорит, что это отличие не дает различия — поведение в обоих мирах описывается одними и теми же уравнениями.

Несмотря на то что детали являются более сложными, процедуры использования симметрии для понимания нашего мира в основном соответствуют тем, которые мы использовали в нашем простом примере из мира треугольников. Мы считаем, что наши уравнения могут быть преобразованы таким образом, чтобы они в принципе изменились, и после этого мы требуем, чтобы они фактически не менялись. Возможное отличие не имеет никакого значения. Как и в примерах с треугольниками, для обеспечения общей симметрии должны соблюдаться несколько правил. Объекты, которые присутствуют в уравнениях, должны иметь особые свойства, образовывать связанные наборы и подчиняться тесно связанным законам.

Таким образом, симметрия может быть мощной идеей с богатыми следствиями. Кроме того, эту идею очень любит Природа. Приготовьтесь к публичной демонстрации любви.

Гайки, болты, катушки и палочки

Теория кварков и глюонов называется квантовой хромодинамикой или КХД. Уравнения КХД приведены на рис. 7.3*.

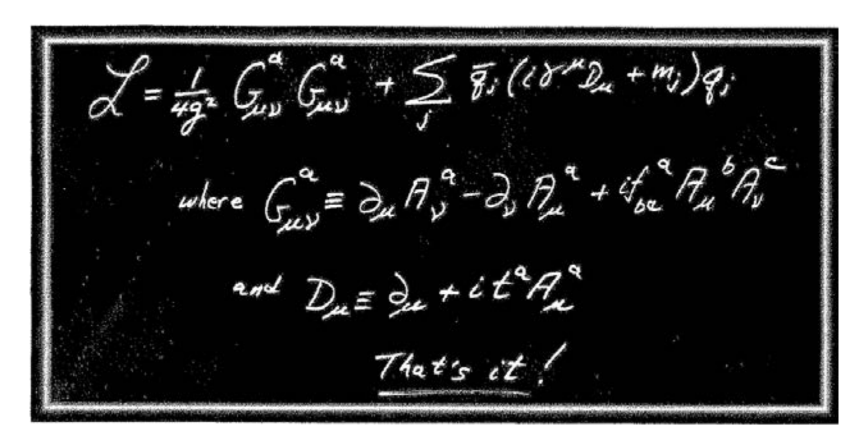


Рис. 7.3. Приведенный здесь лагранжиан *L* для КХД в принципе представляет собой полное описание сильного взаимодействия. Здесь m_j и q_j — это масса и квантовое поле кварка сорта *j*, а *A* — это глюонное поле с пространственно-временными индексами μ, ν и цветовыми индексами *a*, *b*, *c*. Значения числовых коэффициентов *f* и *t* полностью определяются цветовой симметрией. Помимо масс кварков, константа взаимодействия *g* является единственным свободным параметром в теории. На практике, чтобы вычислить что-либо с помощью лагранжиана *L*, требуются немалая изобретательность и упорный труд

Довольно компактно, не правда ли? Ядерная физика, новые частицы, странное поведение, происхождение массы — все здесь!

На самом деле вам не стоит сразу удивляться тому факту, что мы можем записать уравнения в компактной форме. Наш умный друг Фейнман показал, как записать уравнение Вселенной в одну строку. Вот оно:

$$U = 0.$$

* Не беспокойтесь, экзамена не будет. — *Примеч. авт.*

U — это определенная математическая функция, выражающая все. Это сумма вкладов всех частичных законов физики. Чтобы быть точным, $U = U_{\text{Ньютон}} + U_{\text{Эйнштейн}} + \ldots$ Например, вклад ньютоновской механики $U_{\text{Ньютон}}$ определяется как $U_{\text{Ньютон}} = (F - ma)^2$; вклад эйнштейновского соотношения «масса/энергия» определяется как $U_{\text{Эйнштейн}} = (E - mc^2)^2$ и т. д. Поскольку каждый вклад положителен или равен нулю, то единственный способ обращения U в ноль подразумевает обращение в ноль каждого вклада. Поэтому выражение $U = 0$ подразумевает то, что $F = ma$, $E = mc^2$, и это касается любого другого прошлого или будущего закона!

Так мы можем охватить все известные нам законы физики и учесть еще не открытые в одном универсальном уравнении. Теория Всего!!! Разумеется, это жульничество, поскольку не существует никакого способа использовать или даже определить U, кроме разбиения на отдельные фрагменты и их дальнейшего применения.

Уравнения, приведенные на рис. 7.3, очень сильно отличаются от шуточной унификации Фейнмана. Как и в $U = 0$, в управляющих уравнениях КХД зашифровано множество отдельных более мелких уравнений. (Для экспертов: управляющие уравнения содержат матрицы тензоров и спиноров, более мелких уравнений, компоненты которых включают обычные числа.) Тем не менее существует большая разница. Когда мы раскладываем уравнение $U = 0$, мы получаем множество не связанных друг с другом вещей. Когда мы раскладываем управляющие уравнения КХД, мы получаем уравнения, которые связаны симметрией — цветов, различных направлений в пространстве, а также симметрией специальной теории относительности между системами, движущимися с постоянной скоростью. Все их содержимое непосредственно доступно, а распаковывающие их алгоритмы вытекают из однозначной математики симметрии. Итак, позвольте мне заверить вас в том, что вы сейчас действительно удивитесь! Это по-настоящему элегантная теория.

Данная элегантность проявляется, в частности, в том, что суть КХД можно без серьезного искажения отразить в нескольких простых картинках. Они приведены на рис. 7.5. Мы обсудим их прямо сейчас.

Но сначала в качестве разминки и для сравнения я хотел бы в аналогичном формате представить суть квантовой электродинамики (КЭД). Как следует из названия, КЭД предполагает квантово-механическое описание электродинамики. Теория КЭД несколько старше теории КХД. Основные уравнения квантовой электродинамики были сформулированы уже к 1931 году, однако на протяжении долгого времени люди совершали ошибки при попытке их решения и получали бессмысленные (бесконечные) ответы, из-за чего эти уравнения получили плохую репутацию. И только около 1950 года несколько блестящих теоретиков (Ханс Бете, Синъитиро Томонага, Джулиан Швингер, Ричард Фейнман, Фримен Дайсон) решили проблему.

Суть КЭД можно выразить с помощью единственного изображения, приведенного на рис. 7.4, *а*. На нем показано, что фотон реагирует на присутствие или движение электрического заряда. Эта маленькая картинка, хоть и кажется мультяшной, представляет собой гораздо больше, чем метафору. Это базовый процесс системного метода решения уравнений квантовой электродинамики, которым мы обязаны Фейнману. (Да, опять он. Прости, Мюррей.) Диаграммы Фейнмана изображают процессы в пространстве и времени, в результате которых частицы находившиеся в некотором месте в одно время, перемещаются в другое место в некоторое другое время. Между этими моментами они могут влиять друг на друга.

Возможные процессы и влияния в квантовой электродинамике строятся путем произвольного соединения мировых линий (то есть путей в пространстве и времени) электронов и фотонов с использованием базового процесса. Это легче сделать, чем описать, и вы легко получите общее представление, тщательно изучив рис. 7.4, *б–е*.

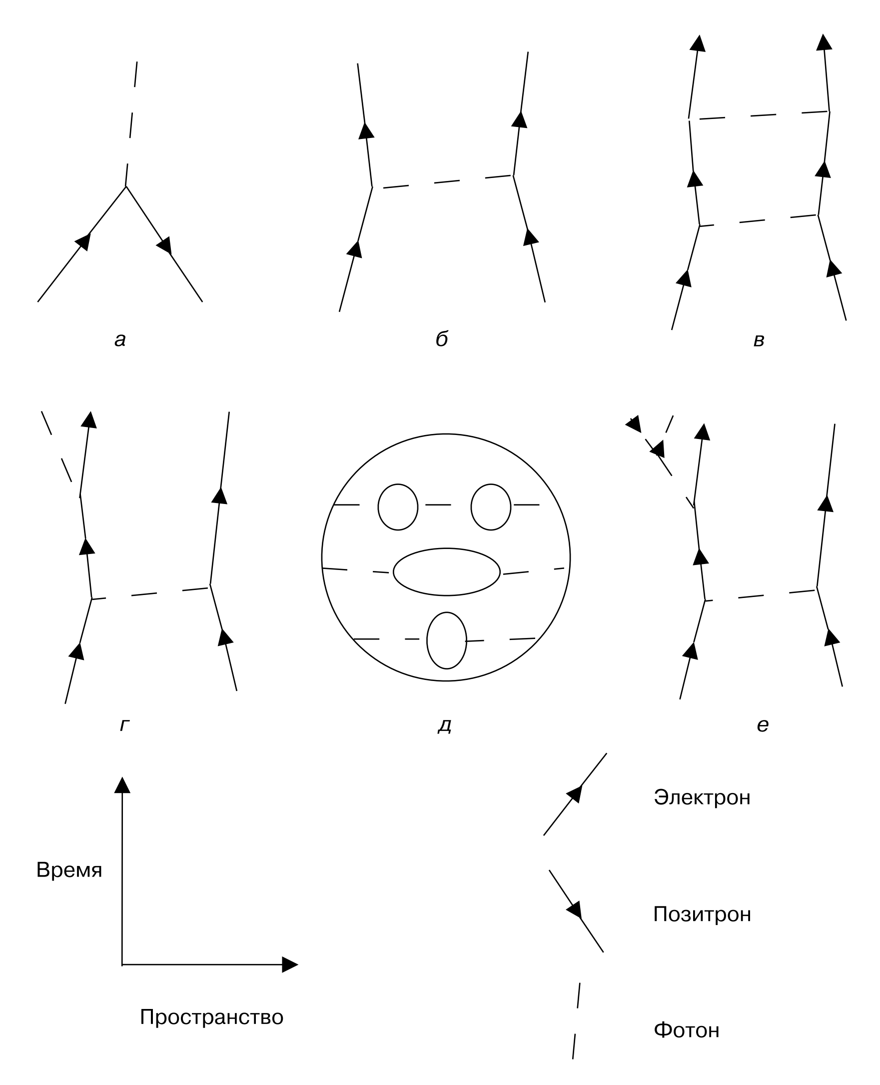


Рис. 7.4. Суть КЭД: *а* — суть квантовой электродинамики состоит в следующем: фотоны реагируют на электрический заряд; *б* — хорошее приближение к силе взаимодействия между электронами в результате обмена виртуальными фотонами; *в* — более точное приближение подразумевает такие вклады; *г* — да будет свет! Ускоренный электрон может испустить фотон; *д* — полностью виртуальный процесс; *е* — излучение пары «электрон — позитрон». Антиэлектрон, или позитрон, представлен в виде электрона, движущегося назад во времени

Для каждой диаграммы Фейнмана совершенно конкретные математические правила определяют вероятность того, что изображаемый на ней процесс произойдет. Правила для сложных процессов, вероятно, с участием многих реальных и виртуальных заряженных частиц и множества реальных и виртуальных фотонов построены на основе базового процесса. Это похоже на сборку из конструктора TinkerToy. Частицы представляют собой различные виды палочек, которые можно использовать, а базовый процесс — соединяющие их катушки или узлы. Учитывая наличие этих элементов, можно сказать, что правила строительства полностью определены. Например, на рис. 7.4, *б* показано, как присутствие одного электрона влияет на другой. Правила диаграмм Фейнмана говорят вам, насколько велика вероятность того, что обмен одним виртуальным фотоном, как показано на рисунке, заставит электроны отклониться на конкретную величину. Другими словами, они расскажут вам о силе! В этой диаграмме заключена классическая теория электрических и магнитных взаимодействий, которую мы преподаем студентам. В эту теорию вносятся поправки, когда вы принимаете во внимание более редкие процессы, предполагающие обмен двумя виртуальными фотонами, как показано на рис. 7.4, *в*. Кроме того, фотон может вырваться на свободу, как показано на рис. 7.4, *г*: это то, что мы называем электромагнитным излучением, одной из форм которого является свет. Могут иметь место и такие процессы, в которых все частицы виртуальные, как показано на рис. 7.4, *д*. Поскольку ни одна из участвующих частиц не является наблюдаемой, этот «вакуумный» процесс может показаться академическим или метафизическим, однако мы увидим, что такого рода процессы имеют огромную важность*.

---

* Однажды у меня состоялся очень интересный разговор об этом с самим Фейнманом. Он сказал мне, что первоначально надеялся удалить из теории эти вакуумные процессы и был очень разочарован, не найдя последовательного способа это сделать. Я подробнее расскажу об этом разговоре в главе 8. — *Примеч. авт.*

Уравнения Максвелла для радиоволн и света, уравнение Шредингера для атомов и химии, а также более утонченная версия Дирака, включающая спин и антиматерию, — все это и многое другое закодировано в этих закорючках.

Выраженная в той же живописной манере теория КХД выступает в качестве расширенной версии КЭД. Ее более сложный набор компонентов и базовых процессов приведен на рис. 7.5. Соответственно, она имеет более сложную расшифровку.

На уровне этой иллюстрации КХД очень похожа на КЭД, только больше. Диаграммы выглядят почти одинаково, и правила их оценки похожи, однако здесь представлено больше видов палочек и катушек. Если точнее, то, тогда как в КЭД есть только один вид заряда, а именно электрический заряд, в КХД их три.

Три вида заряда в КХД без особой на то причины называются «цветами». Эти «цвета», разумеется, не имеют ничего общего с цветом в обычном смысле этого слова; скорее, они очень похожи на электрический заряд. В любом случае мы будем называть их красным, зеленым и синим. Каждый кварк имеет одну единицу того или иного цветного заряда. Кроме того, кварки бывают разных сортов или «ароматов». Два аромата, которые играют определенную роль в обычной материи, называются *u* и *d*, верхний и нижний*. Кварковые «ароматы» также не имеют ничего общего с запахом, как кварковые «цвета» не имеют ничего общего с цветом. Кроме того, эти метафорические названия для кварков *u* и *d* (дзенский коан: каков вверх на вкус?) не означают, что между ароматами и направлениями в пространстве существует какая-то реальная связь. Не вините меня; когда я получаю возможность назвать частицу, я употребляю по-научному звучащие слова, например «аксион» и «энион».

---

* Ранее я упоминал о третьем кварковом аромате, о странном кварке *s*. Существует еще три кварковых аромата: очарованный *c*, прелестный *b* и истинный *t*. Они являются еще более тяжелыми и нестабильными, чем *s*-кварк. Мы проигнорируем их все. — *Примеч. авт.*

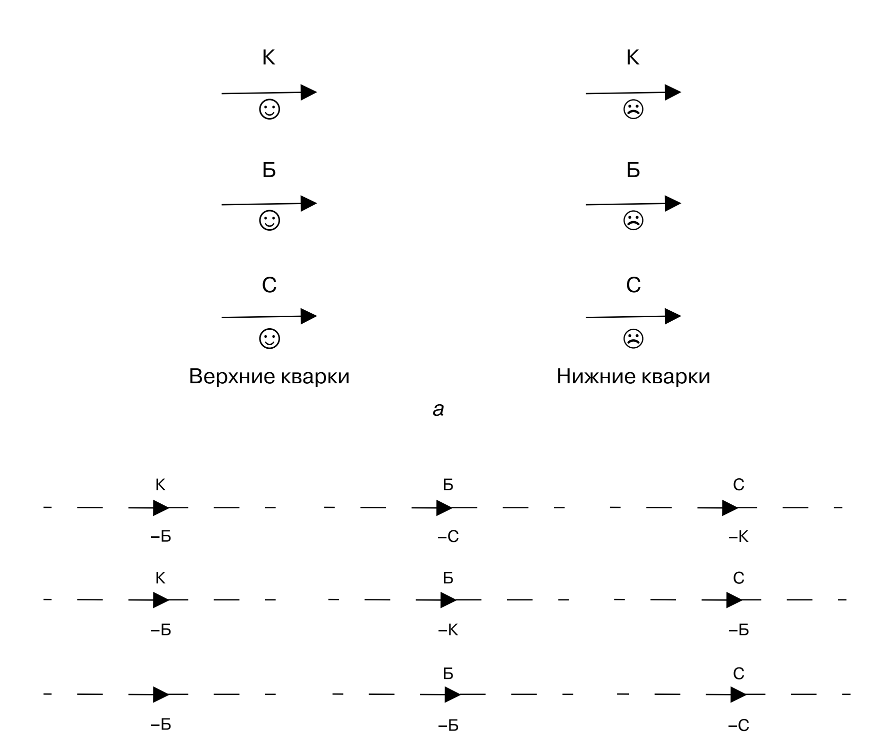


Рис. 7.5 *(начало).* Компоненты и процессы КЭД: *а* — кварки (антикварки) являются носителями одной положительной (отрицательной) единицы цветного заряда. Их роль в КХД аналогична роли электронов в КЭД. Сложность заключается в существовании нескольких различных сортов, или ароматов, кварков. Два из них, которые имеют большое значение для обычного вещества, являются самыми легкими и называются *u* и *d* (следует сказать, что существуют и различные ароматы электронов, называемые мюонами и тау-лептонами, однако я старался избегать лишних сложностей); *б* — существует восемь различных цветных глюонов. Каждый переносит единицу цветового заряда и приносит другой цвет (возможно, тот же самый). Сумма каждого цветового заряда сохраняется. Для глюонов существует 3 × 3 = 9 различных вариантов. Но одна конкретная комбинация, так называемый цветовой синглет *SU*(3), который одинаково реагирует на все заряды, отличается от других. Мы должны избавиться от него для получения совершенно симметричной теории. Таким образом, мы предполагаем, что существует ровно восемь глюонов. К счастью, этот вывод подтверждается экспериментом. Глюоны в КХД играют роль, аналогичную роли фотонов в КЭД

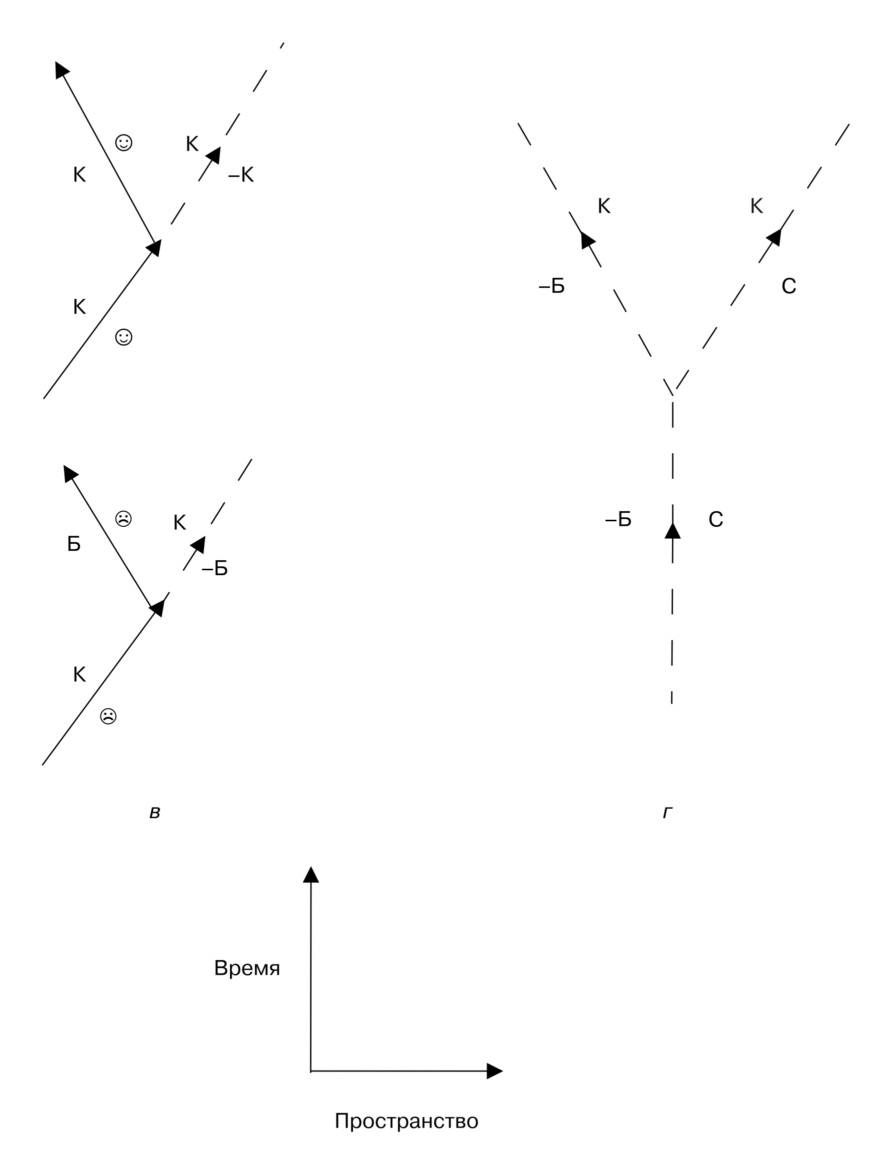


Рис. 7.5 *(продолжение).* Компоненты и процессы КЭД: *в* — два показательных базовых процесса, где глюоны просто реагируют, или и реагируют, и изменяют цветной заряд кварков; *г* — качественно новой чертой КХД по сравнению с КЭД является существование процессов, в которых цветные глюоны влияют друг на друга. Фотоны этого не делают

Продолжая аналогию между КЭД и КХД, следует сказать о существовании фотоноподобных частиц, называемых цветными глюонами, которые должным образом реагируют на присутствие или движение цветного заряда, подобно тому как фотоны реагируют на электрический заряд.

Итак, существуют *u*-кварки с единицей красного заряда, *d*-кварки с единицей зеленого заряда — всего шесть различных возможностей. И вместо одного фотона, который реагирует на электрический заряд, в КХД существует восемь цветных глюонов, которые могут либо реагировать на другие цветные заряды, либо изменить один цветной заряд на другой. Таким образом, существует довольно большое разнообразие палочек и катушек, с помощью которых их можно соединить. Вам покажется, что все эти возможности создают ужасные сложности и беспорядок. И так бы все и было, если бы не удивительная симметрия теории. Например, если везде заменить красный синим, у вас все равно получатся те же самые закономерности. Симметрия КХД позволяет непрерывно смешивать цвета, образуя смеси, и правила должны быть одинаковыми как для смесей, так и для чистых цветов. Эта расширенная симметрия является чрезвычайно мощной. Она фиксирует относительную силу всех узлов.

Несмотря на все сходства, между КХД и КЭД, есть и несколько существенных различий. Во-первых, реакция глюонов на цветной заряд, измеряемый с помощью константы взаимодействия КХД, является гораздо более энергичной по сравнению с реакцией фотонов на электрический заряд.

Во-вторых, как показано на рис. 7.5, *в*, кроме реагирования на цветной заряд глюоны также могут изменять один цветной заряд на другой. Допускаются все возможные изменения такого рода. Тем не менее каждый цветной заряд сохраняется, поскольку сами глюоны могут переносить несбалансированные цветные заряды. Например, если в результате поглощения глюона кварк с синим

зарядом изменяется на кварк с красным зарядом, то поглощенный глюон переносил одну единицу красного заряда и минус одну единицу синего заряда. С другой стороны, кварк с синим зарядом может испустить глюон с одной единицей синего заряда и минус одной единицей красного заряда; в результате этого процесса он превращается в кварк с красным зарядом.

Третье, самое глубокое, различие между КХД и КЭД является следствием второго. Поскольку глюоны реагируют на присутствие и движение цветного заряда и переносят несбалансированный цветной заряд, глюоны, в отличие от фотонов, реагируют непосредственно друг на друга.

Фотоны, напротив, являются электрически нейтральными. Они не реагируют друг на друга. Мы все знаем это, даже если никогда об этом не задумывались. Когда вы оглядываетесь вокруг в солнечный день, все освещено отраженным в разные стороны светом, однако вы видите сквозь него. Бои на световых мечах, которые вы наблюдали в «Звездных войнах», не могут иметь места в нашем мире. Возможное объяснение: это фильм о технологически развитой цивилизации в далекой-далекой галактике, в которой, вероятно, используются лазеры с цветными глюонами.

В любом случае каждое из этих различий больше усложняет процесс вычисления последствий КХД, чем последствий КЭД. Поскольку основное взаимодействие является более сильным в КХД, чем в КЭД, более сложные диаграммы Фейнмана с большим количеством узлов создают относительно большие вклады в любой процесс. А поскольку существуют различные возможности для маршрутизации потоков цвета и больше разнообразных видов узлов, на каждом уровне сложности существует гораздо больше диаграмм.

Асимптотическая свобода позволяет вычислить такие вещи, как общие потоки энергии и импульса в струях. Это связано с тем, что многие события мягкой радиации не сильно влияют на общий

поток, поэтому мы можем игнорировать их в наших расчетах. Нашего внимания требуют лишь немногочисленные узлы, в которых возникает жесткое излучение. Таким образом, используя карандаш и бумагу, человек без особого труда может рассчитать относительную вероятность появления различного количества струй, выходящих под разными углами с различной долей энергии. (Конечно, этому человеку не помешают ноутбук и несколько лет, проведенных в аспирантуре.) В других случаях уравнения решаются с получением лишь приблизительных результатов и с приложением героических усилий. В главе 9 мы обсудим эти героические усилия, позволяющие рассчитать массу протона, начиная от безмассовых кварков и глюонов, и таким образом определить происхождение массы.

Кварки и глюоны 3.0: воплощенная симметрия

Пытаясь отдать должное способу, при использовании которого постулат о высокой степени симметрии (то, что мы называем *локальной* симметрией) вынуждает нас включить в уравнения цветные глюоны и таким образом предсказать их существование и все их свойства, я вспомнил один из моих любимых афоризмов Пита Хейна:

> *«Влюбленные в прозе и рифме*
> *в тысячный раз пытаются*
> *выразить то,*
> *что легче сделать, чем сказать».*

Так или иначе, приступим к прозе и стихам.

Ранее в тексте, где мы обсуждали цветные треугольники и их симметрию, была сноска о том, что вам следует игнорировать факт нахождения разных треугольников в разных местах. С точки зре-

ния логики и математики это имеет смысл. В математике мы часто игнорируем незначительные детали, чтобы сконцентрироваться на наиболее интересных, существенных особенностях. Например, в геометрии стандартной процедурой является использование линий, имеющих нулевую толщину и продолженных до бесконечности в обоих направлениях. Однако с точки зрения физики несколько странным является предположение о том, что симметрия требует не принимать во внимание местонахождение вещей. Например, странно, что симметрия между красным зарядом и синим зарядом требует превратить кварки с красным зарядом в кварки с синим зарядом и *наоборот* во всей Вселенной. Более естественным является предположение о возможности произвести только локальные изменения, не беспокоясь о далеких частях Вселенной.

Эта естественная с физической точки зрения версия симметрии называется *локальной* симметрией. Локальная симметрия представляет собой гораздо более сильное допущение, чем альтернативная, глобальная симметрия. Локальная симметрия является огромным набором отдельных симметрий, грубо говоря, отдельных симметрий для каждой точки пространства и времени. В нашем примере мы можем изменить красный заряд на синий в любом месте и в любой момент времени. Таким образом, каждое место и момент времени определяют свою собственную симметрию. Глобальная симметрия не делает различий между единицами цветного заряда в разных местах и в разные моменты времени. В случае глобальной симметрии вы должны сделать это преобразование повсеместно и во все моменты времени, и вместо бесконечного множества независимых симметрий у вас будет только одна согласованная версия.

Поскольку локальная симметрия выступает более сильным допущением по сравнению с глобальной, она накладывает больше ограничений на уравнения или, другими словами, на форму

физических законов. На самом деле ограничения, налагаемые локальной симметрией, являются настолько серьезными, что на первый взгляд может показаться: их невозможно примирить с идеями квантовой механики.

Прежде чем объяснять эту проблему, я приведу краткий обзор соответствующих положений квантовой механики: в ней мы должны допустить возможность того, что частица может наблюдаться в разных местах с разными вероятностями. Эти вероятности описываются волновой функцией. Большие значения волновой функции соответствуют большой вероятности, а малые значения — малой вероятности (количественно вероятность равна квадрату волновой функции). Кроме того, «красивые» (или «хорошие») и гладкие волновые функции, которые соответствуют плавным изменениям в пространстве и времени, имеют меньшую энергию по сравнению с теми, которым свойственны резкие изменения.

Теперь перейдем к сути проблемы: давайте предположим, что у нас есть «хорошая» гладкая волновая функция для кварка, переносящего красный цветной заряд. Теперь применим наш пример локальной симметрии в малом пространстве, изменив красный цветной заряд на синий. После этого превращения наша волновая функция станет изменяться быстро. Внутри этого небольшого пространства она имеет только синий цветной компонент, а снаружи — только красный цветной. Итак, мы превратили низкоэнергетическую волновую функцию без резких изменений в волновую функцию, которая быстро изменяется и, следовательно, описывает состояние высокой энергии. Это изменение состояния приведет к изменению поведения кварков, которое мы описываем безошибочно, поскольку существует множество способов обнаружить изменения в уровне энергии. Например, согласно второму закону Эйнштейна вы можете определить энергию кварка, взвесив его. Однако вся суть симметрии заключается в том, что преобра-

зование не должно приводить к изменению поведения вещей*. Мы хотим получить отличие *без* различия.

Таким образом, чтобы получить уравнения, имеющие локальную симметрию, мы должны исправить правило, согласно которому резкие изменения волновой функции обязательно соответствуют большой энергии. Мы должны предположить, что энергия не регулируется только крутизной изменения волновой функции; необходимы дополнительные поправочные члены. Вот где в игру вступают глюонные поля. Поправочный член содержит продукты различных глюонных полей (восемь для КХД) с различными цветными компонентами кварковых волновых функций. Если вы все делаете правильно, то при локальном преобразовании изменяется и волновая функция кварков, и глюонное поле, однако энергия волновой функции, включая поправочные члены, остается прежней. Эта процедура не предполагает никакой двусмысленности — локальная симметрия диктует то, что вы должны делать на каждом этапе.

Подробности этого процесса очень трудно передать словами. Это на самом деле, как говорилось в приведенном выше афоризме, «легче сделать, чем сказать», и если вы хотите увидеть, как все это делается, с уравнениями, вам следует обратиться к техническим статьям или учебникам. Я упомянул некоторые из наиболее доступных в примечаниях. К счастью, вам не обязательно вникать в подробности, чтобы понять главный философский смысл, который заключается в следующем.

---

* Симметрия специальной теории относительности изменяет энергию частиц, но также изменяет поведение весов, использующихся для их взвешивания, поэтому мы не обнаружим никакого эффекта. Наша локальная цветовая симметрия, наоборот, не производит никаких изменений в нормальных весах, вроде тех, что используются в продуктовых магазинах, которые имеют нулевой суммарный цветной заряд. Таким образом, они зарегистрируют изменение веса, и нам придется с этим считаться. — *Примеч. авт.*

Чтобы получить локальную симметрию, мы должны ввести глюонные поля. И мы должны обеспечить способы взаимодействия этих глюонных полей с кварками и друг с другом. *Идея* — локальная симметрия — производит конкретный набор уравнений. Другими словами, реализация идеи ведет к реальности-кандидату.

Реальность-кандидат, содержащая цветные глюоны, воплощает в себе идею локальной симметрии. Новые составляющие — цветные глюонные поля — являются частью рецепта для мира-кандидата. Существуют ли они в нашем мире? Как мы уже обсуждали и даже видели на фотографиях, они на самом деле существуют. Реальность-кандидат, родившаяся из идей, — это наша собственная реальность.

Глава 8. Сетка (живучесть эфира)

Что есть пространство: пустая сцена, на которой физический мир материи разыгрывает свою драму; равноправный участник, создающий фон и имеющий свою собственную жизнь; или первичная реальность, вторичным проявлением которой является материя? Мнения по этому вопросу развивались и несколько раз радикально менялись на протяжении всей истории науки. Сегодня торжествует третья точка зрения. Там, где наши глаза ничего не видят, наш разум, обдумывая откровения точных экспериментов, обнаруживает некую Сетку, которая является основой физической реальности.

Философские и научные идеи относительно того, из чего состоит мир, продолжают изменяться. Самые лучшие современные картины мира содержат множество недоработок и загадок. Очевидно, что последнее слово еще не было сказано. Однако мы знаем достаточно для того, чтобы сделать некоторые удивительные выводы, выходящие за рамки разрозненных фактов. Эти выводы предлагают некоторые ответы на вопросы, которые традиционно считались принадлежащими к области философии или даже теологии.

Для естественной философии самый важный вывод, сделанный на основе КХД и асимптотической свободы, заключается в том,

что пространство, которое мы считаем пустым, в действительности является бурной средой, активность которой и формирует наш мир. Другие открытия современной физики подтверждают и обогащают этот вывод. Далее, исследуя существующие границы, мы увидим, как понимание «пустого» пространства в качестве богатой динамической среды насыщает наши самые лучшие идеи, касающиеся объединения сил.

Итак: из чего состоит мир? Приведем многогранный ответ современной физики, как всегда, допускающий дополнения и поправки.

- Первичный компонент физической реальности, из которого все возникло, заполняющий пространство и время.
- Каждый фрагмент — каждый элемент пространства-времени — имеет те же основные свойства, что и любой другой фрагмент.
- Основной компонент реальности оживлен квантовыми процессами. *Квантовое* поведение обладает особыми характеристиками. Оно спонтанно и непредсказуемо. И для наблюдения квантовых явлений вы должны обеспечить возмущение этого компонента.
- Основной компонент реальности также содержит устойчивые материальные компоненты. Они превращают космос в многослойный, разноцветный сверхпроводник.
- Основной компонент реальности содержит метрическое поле, которое обеспечивает пространственно-временную жесткость и является причиной гравитации.
- Основной компонент реальности имеет вес и универсальную плотность.

Существуют слова, которые отражают различные аспекты ответа на вышеприведенный вопрос. «Эфир» — это старое понятие, оно наиболее близкое, однако несет на себе клеймо

устаревших идей и не охватывает некоторых новых. Термин «пространство-время» является логически целесообразным для описания того, что неизбежно существует везде и всегда и обладает постоянными свойствами. Однако понятие «пространство-время» обладает еще большим багажом, включающим среди прочего сильный намек на пустоту. «Квантовое поле» представляет собой технический термин, который суммирует первых три аспекта, но не включает трех последних, кроме того, он кажется слишком техническим, что мешает его применению в области естественной философии.

Я буду использовать слово «Сетка» для обозначения первичного материала, из которого состоит мир. Это слово имеет несколько преимуществ.

- Мы привыкли применять математические сетки для размещения слоев структуры, как показано на рис. 8.1.
- Наши бытовые приборы, светильники и компьютеры питаются от электрической сети. Физический мир, который мы наблюдаем, в общем-то черпает свою энергию из Сетки.
- Мощно развивающийся проект, частично обусловленный потребностями физики*, представляет собой технологию, предусматривающую интеграцию множества рассредоточенных компьютеров в функциональные единицы, к чьей суммарной мощности можно получать доступ по мере необходимости и из любой точки. Эта технология известна как грид-технология (от англ. grid — «сетка»).
- Слово «Сетка» — короткое.
- «Сетка» — это не «Матрица». Мне очень жаль, но сиквелы запятнали этого кандидата. Не имеет «Сетка» ничего общего и с «Боргом».

---

* Как мы обсудим позже. — *Примеч. авт.*

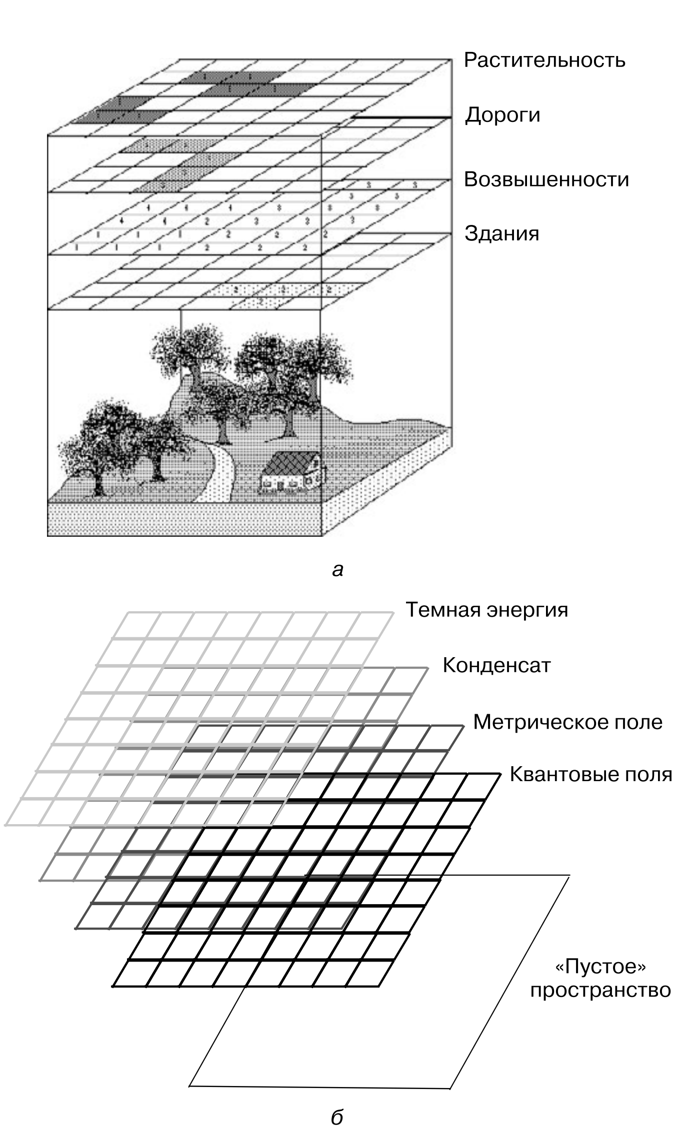


Рис. 8.1. Сетка, старая и новая: *а* — Сетка, которая часто используется для описания того, как различные вещи распределены в пространстве; *б* — Сетка, которая лежит в основе нашей самой успешной картины мира и имеет несколько аспектов. Сетка с этими аспектами присутствует всегда и везде. Обычная материя является вторичным проявлением Сетки, соответствующим уровню ее возбуждения

Краткая история эфира

Споры о пустоте пространства начались задолго до развития современной науки и восходят по крайней мере к древнегреческим философам. Аристотель писал: «Природа не терпит пустоты», в то время как его противники атомисты придерживались мнения, которое поэт Лукреций выразил словами:

> *«Всю, самое по себе, составляют природу две вещи,*
> *Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство,*
> *Где пребывают они и где двигаться могут различно».*

Эхо этих старых дебатов прокатилось на заре современной науки во время научной революции XVII века. Рене Декарт предложил основывать научное описание природного мира на том, что он называл первичными качествами: на расширении (по сути, форме) и движении. Материя не должна была иметь каких-либо других свойств, кроме этих. Важным следствием такого подхода является то, что влияние одного фрагмента вещества на другой может происходить только через контакт (близкодействие) — не имеющий свойств, помимо расширения и движения, фрагмент материи может узнать о других фрагментах, только касаясь их. Таким образом, чтобы описать, например, движение планет, Декарт должен был ввести заполняющий пространство «пленум» невидимой материи. Он предусматривал сложное море водоворотов и завихрений, обусловливающих движение планет.

Исаак Ньютон преодолел все эти потенциальные сложности, сформулировав точные и успешные математические уравнения для движения планет на основе своих законов движения и тяготения. Ньютоновский закон тяготения не вписывается в схему Декарта. Он постулирует действие на расстоянии (дальнодействие) вместо влияния посредством контакта. Например, согласно закону Ньютона, Солнце оказывает гравитационное воздействие

на Землю, хотя не находится в контакте с Землей. Несмотря на то что его уравнения позволяли точно и подробно описать движение планет, Ньютона не устраивало дальнодействие. Он писал:

> *«Предполагать, что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо, передавая действие и силу, это, по-моему, такой абсурд, который немыслим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах».*

Тем не менее он позволил своим уравнениям говорить самим за себя:

> *«Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою. Гипотезам же метафизическим, физическим и механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии».*

Последователи Ньютона, разумеется, не могли не заметить то, что его система опустошила пространство. Будучи менее щепетильными, они стали большими ньютонианцами, чем сам Ньютон. Вот слова Вольтера:

> *«Француз, прибывший в Лондон, обнаружит, что философия, как и все остальное, очень сильно изменилась. Он оставил мир пленума и попал в мир вакуума».*

Познакомившись с идеей дальнодействия и оценив ее успешность, математики и физики примирились с ней. Так обстояли дела на протяжении более 150 лет. Затем Джеймс Клерк Максвелл в процессе объединения всего того, что на тот момент было известно об электричестве и магнетизме, выявил противоречия в полученных уравнениях. В 1861 году Максвелл обнаружил возможность исправления этих противоречий путем введения в уравнения до-

полнительного члена, другими словами, постулируя существование нового физического эффекта. Несколькими годами ранее Майкл Фарадей обнаружил, что, когда магнитные поля изменяются во времени, они производят электрические поля. Для исправления своих уравнений Максвелл должен был постулировать обратный эффект, предполагающий, что изменение электрических полей производит магнитные поля. Благодаря этому дополнению поля могли жить своей собственной жизнью: изменение электрических полей создает (изменяет) магнитные поля, которые создают (изменяют) электрические поля, и так далее в самовоспроизводящемся цикле.

Максвелл обнаружил, что его новые уравнения, известные сегодня как уравнения Максвелла, имели такого рода чисто полевые решения, которые распространяются в пространстве со скоростью света. В кульминации процесса великого синтеза он пришел к выводу о том, что эти самовоспроизводящиеся возмущения в электрических и магнитных полях представляют собой свет, и этот вывод выдержал испытание временем. Для Максвелла эти поля, которые заполняют все пространство и живут своей собственной жизнью, являлись осязаемым символом величия Господа:

> *«Обширные межпланетные и межзвездные области больше не будут рассматриваться в качестве пустых мест во Вселенной, которые Творец не посчитал нужным заполнить символами многообразия порядка Своего царства. Мы обнаружим, что они уже заполнены замечательной средой; настолько заполнены, что никакая человеческая сила не в состоянии изъять ее из самой маленькой части Пространства или хотя бы в малой степени нарушить ее бесконечную непрерывность».*

Отношения Эйнштейна с эфиром были сложными и менялись с течением времени. Кроме того, я думаю, что они были плохо

поняты даже его биографами и историками науки (вполне возможно, и мной). В своей первой работе 1905 года, посвященной специальной теории относительности*, под названием «К электродинамике движущихся тел» он писал:

> *«Введение "светоносного эфира" окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится "абсолютно покоящееся пространство", наделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-нибудь вектор скорости».*

Это сильное заявление Эйнштейна озадачивало меня в течение длительного времени по следующей причине. В 1905 году проблемой физики было не отсутствие теории относительности. Проблема заключалась в существовании *двух взаимно противоречивых* теорий относительности. С одной стороны, была теория относительности механики, подчинявшаяся уравнениям Ньютона. С другой — теория относительности электромагнетизма, подчинявшаяся уравнениям Максвелла.

Обе эти теории относительности показали, что их соответствующие уравнения демонстрируют буст-симметрию, то есть эти уравнения принимают одну и ту же форму, когда вы добавляете ко всему общую, суммарную скорость. Выражаясь в физических терминах, законы физики (выраженные уравнениями) выглядят одинаково для любых двух наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью относительно друг друга. Тем не менее, чтобы переключиться с описания мира одного наблюдателя на описание другого, вам придется переобозначить положения и моменты времени. Например, наблюдатель, находящийся в самолете, летящем из Нью-Йорка в Чикаго, спустя несколько часов определит Чикаго как «расстояние 0», в то время как Чикаго по-прежнему будет

---

* Во второй был введен второй закон Эйнштейна. — *Примеч. авт.*

обозначаться как «расстояние 500 миль к западу» (примерно) для наблюдателя на земле. Проблема заключалась в том, что переобозначение, необходимое для механической относительности, отличалось от переобозначения, требующегося для электромагнитной относительности. Согласно механической теории относительности, вы должны переобозначить пространственные положения, но не моменты времени; в то время как в соответствии с электромагнитной теорией относительности вы должны переобозначить и то и другое гораздо более сложным образом, смешав их вместе. (Уравнения относительности для электромагнетизма к 1905 году уже были выведены Лоренцем и усовершенствованы Анри Пуанкаре; сегодня они известны как преобразования Лоренца.) Великое новшество работы Эйнштейна заключалось в утверждении примата относительности электромагнитных явлений и выработке следствий для остальной части физики.

Итак, изменения требовала почтенная теория ньютоновской механики, а не «выскочка»-теория электромагнетизма. Позиции сдала теория, основанная на частицах, движущихся в пустом пространстве, а не теория, базирующаяся на непрерывных, заполняющих пространство полях. Специальная теория относительности не модифицировала уравнения поля Максвелла; напротив, они служили ей фундаментом. Заполняющие пространство, способные самовосстанавливаться электрические и магнитные поля по-прежнему имели место, что приводило Максвелла в восторг. Действительно, идеи специальной теории относительности практически *требуют* заполняющих пространство полей и в этом смысле объясняют, почему они существуют, как мы увидим далее.

Почему же тогда Эйнштейн так сильно выражал противоположное мнение? Он подорвал старые идеи о механическом эфире, который в соответствии с законами Ньютона состоял из частиц, — действительно, он совершенно разрушил эти законы. Однако вместо

того, чтобы устранить заполняющие пространство поля, его новая теория повысила их статус. Он мог бы с большей справедливостью сказать (я всегда так думал), что идея эфира, который выглядит по-разному для движущихся наблюдателей, ошибочна, однако преобразованный эфир, который выглядит одинаково для наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью относительно друг друга, является естественной предпосылкой для специальной теории относительности.

Во время работы над специальной теорией относительности в 1905 году Эйнштейн также размышлял над проблемой световых квантов (того, что позднее стало известно под этим названием). Несколькими годами ранее, в 1899 году, Макс Планк впервые выдвинул идею о том, что в конечном итоге превратилось в квантовую механику. Планк предположил, что атомы могут обмениваться энергией с электромагнитным полем, то есть излучать и поглощать электромагнитное излучение, например свет, только в виде дискретных единиц, или квантов. Используя эту идею, он смог объяснить некоторые экспериментальные факты, касающиеся излучения черного тела. (Очень грубо говоря, проблема заключается в том, как цвет горячего тела, вроде раскаленной кочерги или сияющей звезды, зависит от его температуры. Выражаясь менее туманно, но все еще недостаточно точно, горячее тело испускает целый спектр цветов с различной степенью интенсивности. Задача состояла в описании всего спектра степеней интенсивности и его изменения в зависимости от температуры.) Идея Планка работала эмпирически, но она не являлась достаточно удовлетворительной в интеллектуальном отношении. Она была просто «пристегнута» к другим законам физики, а не выведена из них. В самом деле, как Эйнштейн (но не Планк) четко осознал, идея Планка *противоречила* прочим законам.

Другими словами, идея Планка была еще одной из тех вещей, вроде исходной кварковой модели или партонов, которые работа-

ют на практике, но не в теории. Она не была приемлема ни для Чикагского университета, ни для Эйнштейна. Однако Эйнштейн был очень впечатлен тем, как идея Планка объясняла результаты экспериментов. Он расширил ее в новом направлении, сформулировав гипотезу о том, что не только атомы испускают и поглощают свет (и электромагнитное излучение в целом) в виде дискретных единиц энергии, но и сам свет всегда поступает в виде дискретных единиц энергии, а также переносит дискретные единицы импульса. Благодаря этим дополнениям Эйнштейн смог объяснить больше фактов и предсказать новые, включая фотоэлектрический эффект (фотоэффект), ставший основной работой, за которую в 1921 году ему была присуждена Нобелевская премия. Эйнштейн считал, что разрубил гордиев узел: идея Планка не согласуется с существующими физическими законами, но она работает, следовательно, эти законы неверны!

Если свет путешествует в виде «фрагментов» энергии и импульса, что может быть более естественным, чем рассмотрение этих фрагментов — и самого света — в качестве частиц электромагнетизма? Как мы увидим далее, поля могут оказаться более удобными, однако Эйнштейн никогда не ценил удобство выше принципа. Я подозреваю, что он, размышляя над этим вопросом, под необычным углом посмотрел на то, какие уроки следует извлечь из специальной теории относительности. Для него идея о заполняющей пространство сущности, которая выглядит одинаково, когда вы перемещаетесь мимо нее с конечной скоростью, что в соответствии со специальной теорией относительности было свойственно «светоносному эфиру», противоречила здравому смыслу и поэтому казалась подозрительной. Эта точка зрения, которая бросает тень на электромагнитную теорию света Максвелла, подтвердила его догадки относительно излучения черного тела и фотоэффекта, основанные на работе Планка и на его собственной работе. Эйнштейн считал, что вместе эти разработки — эфир

начал противоречить здравому смыслу и, казалось, принимал физическую форму только в виде фрагментов — являлись вескими аргументами в пользу отказа от полей и возврата к частицам.

В своей публичной лекции 1909 года Эйнштейн сказал следующее:

> *«В любом случае эта концепция кажется мне наиболее естественной: проявление электромагнитных волн света ограничивается точками сингулярности, как проявление электростатических полей в теории электронов. Нельзя исключать возможность того, что в такой теории всю энергию электромагнитного поля можно рассматривать как локализованную в этих сингулярностях так же, как в старой теории дальнодействия. Я представляю, что каждая такая точка сингулярности окружена полем, имеющим по существу тот же характер плоской волны, амплитуда которого убывает с увеличением расстояния между точками сингулярности. Если многие из таких точек сингулярности находятся друг от друга на расстоянии, которое является небольшим относительно протяженности поля одной точки сингулярности, то их поля будут накладываться друг на друга и в своей совокупности сформируют осциллирующее поле, которое лишь незначительно отличается от осциллирующего поля в нашей нынешней электромагнитной теории света».*

Другими словами, в 1909 и даже, как я подозреваю, уже в 1905 году Эйнштейн *не* считал, что уравнения Максвелла выражают глубочайшую реальность света. Он не думал, что поля действительно живут своей собственной жизнью. Вместо этого они возникали из «точек сингулярности». Он не думал, что они действительно заполняют пространство: они концентрируются в пакетах вблизи точек сингулярности. Эти идеи Эйнштейна, разумеется, были связаны с его концепцией, заключавшейся в том, что свет поступает в виде дискретных единиц, известных сегодня под названием *фотонов*.

Подобно тому как Ньютон опасался, что естественным следствием его теории является опустошение пространства, Эйнштейн опасался, что естественным следствием его теории является заполнение пространства. Как Колумб, который нашел Новый Свет, пытаясь найти путь в Старый, исследователи, натыкающиеся на неожиданные континенты идей, часто не готовы принять то, что они нашли. Они продолжают искать то, что искали.

К 1920 году, после разработки общей теории относительности, мнение Эйнштейна изменилось: «Более тщательное размышление приводит нас к выводу о том, что специальная теория относительности не заставляет нас отрицать существование эфира». Действительно, общая теория относительности представляет собой очень «эфирную» (то есть основанную на эфире) теорию гравитации. (Я сохранил собственное высказывание Эйнштейна на этот счет для использования далее в этой главе.) Тем не менее Эйнштейн никогда не прекращал попыток устранения электромагнитного эфира:

> *«Если мы будем с точки зрения гипотезы о существовании эфира рассматривать гравитационное и электромагнитное поля, то мы заметим замечательную принципиальную разницу между ними. Не может быть пространства, а также и части пространства без потенциалов тяготения; последние сообщают ему метрические свойства — без них оно вообще немыслимо. Существование гравитационного поля непосредственно связано с существованием пространства.* ***Напротив, очень легко представить себе любую часть пространства без электромагнитного поля...***»*

Примерно в 1982 году у меня состоялся запоминающийся разговор с Фейнманом в Санта-Барбаре. Как правило, по крайней мере с людьми, которых он не очень хорошо знал, Фейнман беседовал в режиме выступления. После целого дня чтения лекций он был

---

* Выделение мое. — *Примеч. авт.*

немного уставшим и расслабленным. В течение двух часов перед обедом мы вели широкую дискуссию о физике. Разговор неизбежно коснулся самого таинственного аспекта нашей картины мира, который был таковым в 1982 году и остается таким и сегодня, — темы космологической постоянной.

Космологическая постоянная, по существу, представляет собой плотность пустого пространства. Забегая немного вперед, стоит сказать, что большой загадкой современной физики является крайне малый вес пустого пространства.

Я спросил Фейнмана: «Разве вас не беспокоит, что гравитация, по-видимому, игнорирует все, что мы узнали о сложностях вакуума?» На что он сразу же ответил: «Я когда-то думал, что разгадал эту загадку».

Затем Фейнман задумался. Обычно он посмотрел бы вам прямо в глаза и заговорил медленно и красиво, плавным потоком идеально сформулированных предложений или даже абзацев. Однако в этот раз он глядел в пространство; он казался отрешенным и ничего не говорил.

Собравшись с мыслями, Фейнман объяснил, что он был разочарован итогами своей работы по квантовой электродинамике. Слышать это от него было странно, поскольку эта блестящая работа подарила миру диаграммы Фейнмана и многие из описанных в ней методов мы до сих пор используем при выполнении сложных вычислений в квантовой теории поля. Кроме того, именно за эту работу он получил Нобелевскую премию.

Фейнман сказал мне, что, когда он понял, что его теория фотонов и электронов математически эквивалентна обычной теории, он потерял надежду. Он надеялся, что, сформулировав свою теорию непосредственно в терминах траекторий частиц в пространстве-времени (диаграммы Фейнмана), он сможет избежать использования концепции поля и создать что-то принципиально

новое и необычное. В течение некоторого времени он считал, что у него это получилось.

Почему он хотел избавиться от полей? «У меня был девиз», — сказал он. Затем он пропел со своим бруклинским акцентом*, постепенно повышая громкость голоса:

> *«Вакуум ничего не весит [драматическая пауза], поскольку там ничего нет!»*

Затем, по-видимому удовлетворенный, но несколько подавленный, он улыбнулся. Его революция не прошла именно так, как планировалась, но это была чертовски хорошая попытка.

Специальная теория относительности и Сетка

Исторически специальная теория относительности была основана на исследовании электричества и магнетизма, результатом которого стала теория поля Максвелла. Таким образом, специальная теория относительности возникла из описания мира, основанного на концепции сущностей (электрических и магнитных полей), которые заполняют все пространство. Такого рода описание представляло собой резкий разрыв с картиной мира, навеянной классической механикой Ньютона и теорией гравитации, которые были широко распространены ранее. Картина мира Ньютона была основана на частицах, которые оказывают друг на друга воздействие через пустое пространство.

Тем не менее положения специальной теории относительности выходят за рамки электромагнетизма. Сущностью специальной

---

* На самом деле его акцент был характерен для жителей Куинса (один из пяти округов Нью-Йорка): Фейнман был родом из района Фар Рокуэй. — *Примеч. авт.*

теории относительности является постулат симметрии: законы физики должны принимать одну и ту же форму после добавления ко всему их содержимому одной и той же постоянной скорости. Этот постулат является универсальной претензией, переросшей свои электромагнитные корни: симметрия специальной теории относительности применяется ко *всем* законам физики. Как мы упоминали ранее, Эйнштейну пришлось изменить законы механики Ньютона, чтобы они подчинялись той же симметрии, что и электромагнетизм.

Пока в работе по специальной теории относительности сохли чернила, Эйнштейн начал искать способы включения гравитации в новую схему. Это было началом десятилетнего поиска, о котором позднее Эйнштейн говорил следующее:

> *«...годы мучительных поисков истины, которую человек ощущает, но не может выразить; сильное желание и чередование уверенности и опасения, пока не будет совершен прорыв к ясности и пониманию, которые известны только тому, кто сам испытал их».*

В конце концов он создал теорию гравитации на основе поля — общую теорию относительности. Мы подробнее поговорим об этой теории позже в этой главе. Несколько других умных людей, включая Пуанкаре, великого немецкого математика Германа Минковского и финского физика Гуннара Нордстрема, также работали над теориями гравитации, которые были бы согласованы с концепциями специальной теории относительности. Все они пришли к теориям поля.

Существует веская причина ожидать, что физические теории, согласующиеся со специальной теорией относительности, должны быть полевыми теориями. Вот она.

Главным результатом специальной теории относительности является существование предельной скорости — скорости све-

та, которая обычно обозначается буквой *c*. Воздействие одной частицы на другую не может передаваться быстрее, чем с этой скоростью. Ньютоновский закон тяготения, согласно которому сила удаленного тела обратно пропорциональна квадрату расстояния *прямо сейчас*, не подчиняется этому правилу, так что он не согласуется со специальной теорией относительности. В реальности само по себе понятие «прямо сейчас» является спорным. События, которые неподвижному наблюдателю кажутся происходящими одновременно, не будут казаться таковыми наблюдателю, движущемуся с постоянной скоростью. Отказ от универсального понятия «сейчас» был, по словам самого Эйнштейна, самым сложным шагом в процессе создания специальной теории относительности:

> *«Все попытки удовлетворительно объяснить этот парадокс обречены на провал до тех пор, пока в бессознательном закреплена аксиома абсолютной природы времени, а именно, одновременности. Очевидно, что осознание этой аксиомы и ее произвольной природы уже предполагает решение проблемы».*

Это удивительно, однако поскольку эта тема хорошо освещена в десятках популярных книг по теории относительности, я не буду углубляться в нее. Для целей настоящего изложения важно лишь то, что существует предельная скорость — *c*.

Теперь рассмотрим рис. 8.2. На рис. 8.2, *а* изображены мировые линии нескольких частиц. Их пространственные положения отмечены на горизонтальной оси, а моменты времени — на вертикальной. Со временем положения частиц изменяются. Положения частицы, меняющиеся во времени, составляют мировую линию этой частицы. Разумеется, у нас должно быть три пространственных измерения, однако даже два — это слишком много для плоской страницы, и, к счастью, нам достаточно одного, чтобы донести

свою мысль. На рис. 8.2, *б* вы видите, что, если воздействие распространяется с конечной скоростью, то воздействие, например, частицы А на частицу В зависит от того, где частица В находилась раньше. Таким образом, чтобы вычислить совокупную силу, воздействующую на частицу, мы должны суммировать воздействия всех остальных частиц, поступающих из различных прежних времен. Это усложняет описание, как показано на рис. 8.2, *в*. Альтернативный подход также изображен на рис. 8.2, *в*. Он заключается в том, чтобы забыть об отслеживании отдельных прошлых положений и вместо этого сосредоточиться на совокупном воздействии. Другими словами, мы следим за *полем*, представляющим совокупность воздействий.

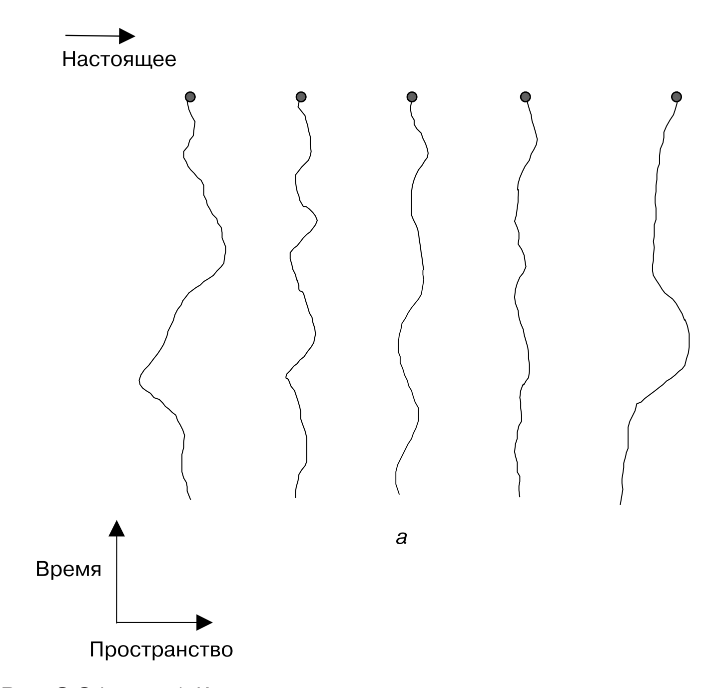


Рис. 8.2 *(начало).* Как специальная теория относительности приводит к полям: *а* — здесь изображены мировые линии нескольких частиц, показывающих, как их положения (горизонтальная ось) меняются с течением времени (вертикальная ось)

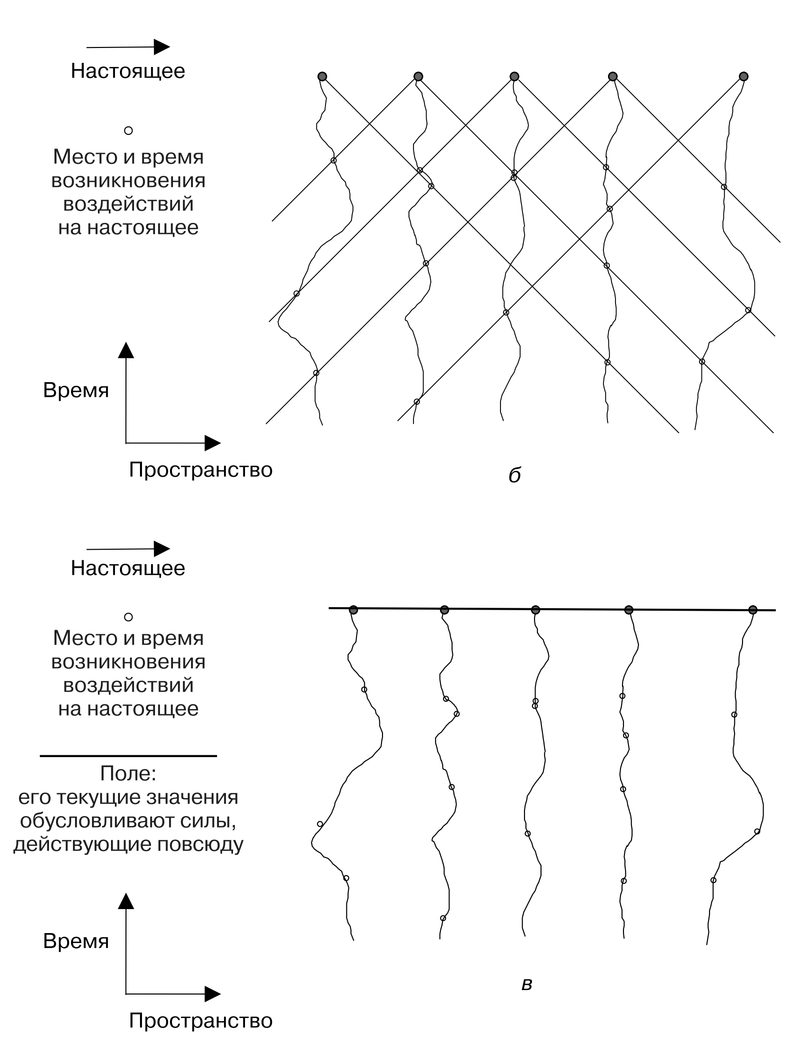


Рис. 8.2 *(продолжение).* Как специальная теория относительности приводит к полям: *б* — если существует предельная скорость, то совокупная сила, воздействующая на любую данную частицу, будет зависеть от того, где другие частицы находились в прошлом. На рисунке также обозначены «линии воздействия», отражающие процесс распространения воздействия с предельной скоростью *c*; *в* — чтобы определить совокупную силу, мы можем либо отслеживать прошлые положения всех тел, либо просто сосредоточиться на сумме воздействий. Первая процедура соответствует теории частиц, а вторая (потенциально гораздо более простая) — теории поля

Такой переход от описания частиц к описанию поля окажется особенно продуктивным, если поля подчиняются простым уравнениям так, что мы можем вычислить будущие значения полей, исходя из значений, которые они имеют в настоящее время, без необходимости учитывать прежние значения. Теория электромагнетизма Максвелла, общая теория относительности и КХД обладают этим свойством. Очевидно, Природа воспользовалась полями для сохранения относительной* простоты вещей.

Глюоны и Сетка

Эйнштейн и Фейнман не знали о логике, предполагающей необходимость полевого описания для фундаментальной физики. Тем не менее, как мы уже видели, каждый из них был готов (и даже жаждал) вернуться к описанию, связанному с частицами.

То, что эти два великих физика в разное время и по разным причинам могли ставить под сомнение существование полей, заполняющих все пространство (важнейший аспект Сетки), показывает, что факт их существования не являлся ошеломляющим даже в XX веке. Сомнения были обусловлены недостаточным количеством надежных доказательств того, что поля живут своей собственной жизнью. В своих комментариях к рис. 8.2 я отметил *удобство* полей. Однако это еще не говорит о том, что они являются *необходимыми составляющими абсолютной реальности*.

Я не думаю, что Эйнштейн когда-либо был уверен в существовании электромагнитного эфира. Одной из его наиболее сильных сторон как физика-теоретика, которая также могла быть его слабостью, являлось упрямство. Упрямство сослужило ему хорошую службу, когда он настоял на разрешении противоречия между двумя теориями относительности, механической и электромагнитной, в пользу последней. Оно также пригодилось ему, когда он настоял на том, что идеи Планка следует воспринять серьезно

* Это не каламбур. — *Примеч. авт.*

и разработать их, несмотря на то, что они противоречили существующей теории. Упрямство Эйнштейна помогло ему справиться со сложной и незнакомой математикой, необходимой для общей теории относительности. С другой стороны, оно помешало ему стать частью грандиозного успеха современной квантовой теории после 1924 года, когда в игру вступили неопределенность и индетерминизм. Оно также не позволило ему принять одно из самых впечатляющих следствий его собственной общей теории относительности — существование черных дыр.

Затруднения Эйнштейна, связанные с примирением квантовой дискретности фотонов с непрерывными полями, заполняющими пространство, которые со времен Максвелла с большим успехом использовались для описания света, преодолеваются в современной концепции квантовых полей. Квантовые поля заполняют все пространство, а квантовые электрические и магнитные поля подчиняются уравнениям Максвелла*. Тем не менее, наблюдая квантовое поле, вы обнаруживаете, что его энергия упакована в дискретные единицы — фотоны. В следующей главе я гораздо подробнее расскажу о странных, но очень успешных концепциях, лежащих в основе квантовой теории поля.

Что касается Фейнмана, то он сдался, когда в процессе разработки математического аппарата для своей версии квантовой электродинамики обнаружил, что введенные для удобства поля живут своей собственной жизнью. Он сказал мне, что утратил уверенность относительно своей программы по опустошению пространства, когда увидел, что и его математический аппарат, и экспериментальные факты требуют введения своего рода *поляризации вакуума* в электромагнитные процессы, изображенные на рис. 8.3 (так как их описал Фейнман с помощью своих диаграмм). Часть *а* соответствует сложному способу обобщения той же физики, которую мы видели на рис. 8.2. Часть *б* добавляет нечто новое. Здесь электромагнитное поле модифицируется благодаря

* В первом приближении. — *Примеч. авт.*

взаимодействию со спонтанной флуктуацией в электроне, или, иными словами, взаимодействию с виртуальной парой «электрон — позитрон». При описании этого процесса очень сложно избежать ссылок на заполняющие пространство поля.

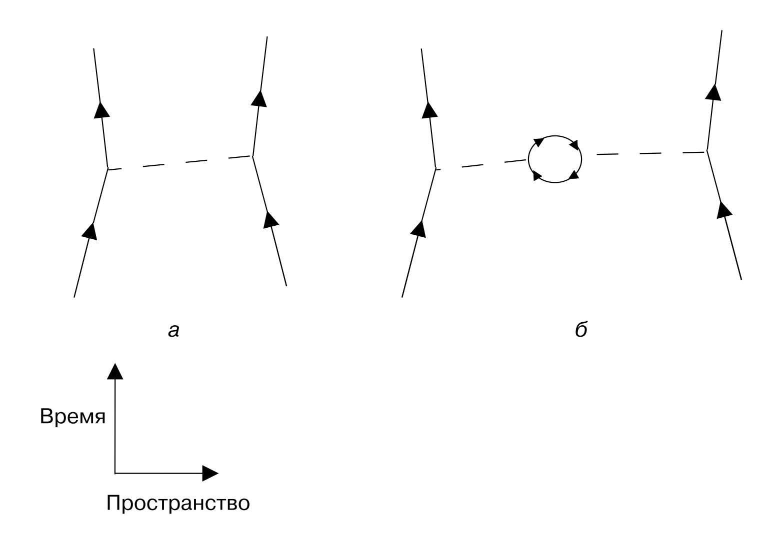


Рис. 8.3. Сила, действующая между электрически заряженными частицами: *а* — краткое изложение физики, представленной на рис. 8.2, на языке диаграмм Фейнмана. На этом уровне электрические и магнитные поля задаются уравнениями Максвелла; однако их также можно проследить до воздействия заряженных частиц. Поля удобны, но, вероятно, мы могли бы обойтись и без них; *б* — дает кое-что новое. Этот вклад в электромагнитные поля определяется спонтанными флуктуациями (виртуальными парами «частица — античастица») в электронном поле

Данная виртуальная пара является следствием спонтанного поведения электронного поля. Это может произойти в любом месте. И где бы оно ни произошло, электромагнитное поле может его ощутить. Эти два события — флуктуации, которые могут происходить и ощущаться где угодно, — совершенно непосредственно отражаются в математических выражениях, сопровождающих рис. 8.3, *б*. Они приводят к сложным, небольшим, но очень специфичным модификациям силы, которую вы вычислили бы с по-

мощью уравнений Максвелла. Эти модификации наблюдались в ходе проведения точных экспериментов.

В КЭД поляризация вакуума представляет собой небольшой эффект, как качественно, так и количественно. В КХД, напротив, она имеет первостепенное значение. В главе 6 мы видели, как это приводит к асимптотической свободе и тем самым позволяет успешно описывать образование струй. В следующей главе мы увидим, как КХД используется для вычисления массы протонов и других адронов. Наши глаза не способны различать крошечные временные промежутки (10^{-24} секунды) и расстояния (10^{-14} сантиметра), где разворачивается основное действие. Однако мы можем проанализировать компьютерные расчеты, чтобы понять, что происходит с кварковыми и глюонными полями. Для более чувствительных глаз пространство было бы похоже на ультрастробоскопическую микронано-лавовую лампу (рис. 8.4). Существа с такими глазами не разделяли бы человеческую иллюзию относительно пустоты пространства.

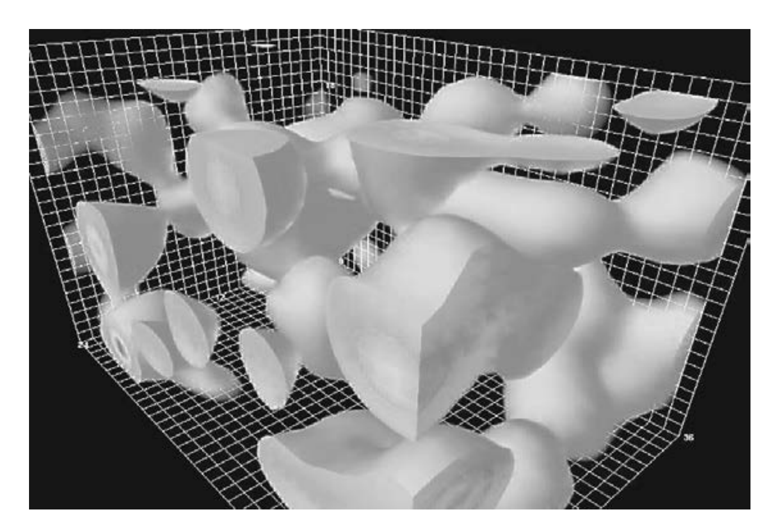


Рис. 8.4. Глубинная структура квантовой Сетки. Это типичная картина флуктуаций в глюонных полях КХД. Такие картины лежат в основе нашего успешного способа вычисления масс адронов, поэтому мы можем быть уверены в том, что они соответствуют действительности

Материальная Сетка

Помимо флуктуационной активности квантовых полей пространство заполнено несколькими слоями более постоянного, существенного материала. Это эфиры, в чем-то близкие по духу первоначальному эфиру Аристотеля и Декарта, — они представляют собой материалы, которые заполняют пространство. В некоторых случаях мы можем определить, из чего они состоят, и даже создать их небольшие образцы.

Физики обычно называют эти материальные эфиры *конденсатами*. Можно сказать, что они (эфиры, а не физики) конденсируются спонтанно из пустого пространства, как утренняя роса или обволакивающий туман конденсируются из влажного, невидимого воздуха.

Лучше всего эти конденсаты можно понять в качестве состоящих из пар «кварк — антикварк». Здесь мы говорим о реальных частицах, а не об эфемерных, виртуальных, которые спонтанно возникают и исчезают. Обычно этот заполняющий пространство туман из кварков и антикварков называется нарушающим хиральную симметрию конденсатом, однако давайте называть его просто $Q\bar{Q}$, сокращенно от «кварк — антикварк».

Для кваркового конденсата $Q\bar{Q}$, как и для других конденсатов, существует два основных вопроса.

- Почему мы считаем, что он существует?
- Как мы можем удостовериться в его существовании?

Только в случае $Q\bar{Q}$ мы имеем хорошие ответы на оба вопроса.

Формирование конденсата $Q\bar{Q}$ обусловлено нестабильностью абсолютно пустого пространства. Предположим, что мы опустошили пространство, удалив конденсат, состоящий из пар «кварк — антикварк», что проще сделать в воображении с помощью уравнений и компьютеров, чем в ходе лабораторных экспериментов. Затем мы вычисляем, что пары «кварк — антикварк» имеют отрицательную совокупную энергию. Затраты энергии на произ-

водство этих частиц (mc^2) более чем компенсируются энергией, которую можно высвободить из сил притяжения, действующих между ними в формируемых ими небольших «молекулах». (Эти «молекулы» кварк — антикварк называются сигма-мезонами (σ-мезонами).) Таким образом, абсолютно пустое пространство является взрывоопасной средой, готовой взорваться реальными «молекулами», состоящими из кварка и антикварка.

Химические реакции обычно начинаются с некоторых составляющих A, B, а их результатом являются некоторые продукты C, D; поэтому мы пишем:

$$A + B \rightarrow C + D,$$

а если выделяется энергия, то:

$$A + B \rightarrow C + D + \text{энергия}.$$

Это выражение означает «взрыв». Таким образом, наша реакция представляет собой следующее:

[ничто] → кварк + антикварк + энергия —

никаких исходных составляющих (кроме пустого пространства) не требуется! К счастью, взрыв самоограничивается. Пары частиц отталкиваются друг от друга, поэтому по мере увеличения их плотности становится все труднее вместить новые частицы. Суммарная стоимость создания новой пары включает в себя дополнительную плату, обусловленную взаимодействием с уже существующими парами. Когда чистой прибыли уже нет, производство останавливается. В результате мы получаем заполняющий пространство кварковый конденсат $Q\bar{Q}$ в качестве стабильного конечного состояния.

Я надеюсь, вы согласитесь, что это интересная история. Но откуда мы знаем, что она правдива?

Один из ответов состоит в том, что математическим следствием уравнений (уравнений КХД) является наличие множества

других способов проверки. Однако, несмотря на совершенную *логичность* данного ответа и на то, что эти проверки, как мы уже обсуждали, очень подробны и убедительны, — это не наука в лучшем ее виде. Нам нужно, чтобы уравнения имели следствия, которые можно наблюдать в физическом мире.

Второй ответ заключается в том, что мы можем просчитать последствия самого конденсата $Q\bar{Q}$ и проверить, соответствуют ли они тому, что мы наблюдаем в физическом мире. Говоря конкретнее, мы можем вычислить, способен ли рассматриваемый в качестве материала конденсат $Q\bar{Q}$ вибрировать и как эти вибрации должны выглядеть. Это похоже на то, чем поклонники «светоносного эфира» когда-то хотели наделить свет — старым добрым материалом, более существенным, чем электромагнитные поля. Вибрации кваркового конденсата $Q\bar{Q}$ — это не видимый свет, однако они описывают нечто совершенно определенное и наблюдаемое, а именно пи-мезоны. Среди адронов пи-мезоны обладают уникальными свойствами. Например, они, безусловно, являются самыми легкими* и они никогда четко не вписываются в кварковую модель. Поэтому весьма удовлетворительным, а после глубокого изучения и чрезвычайно убедительным является то, что они возникают совершенно иначе — как вибрации конденсата $Q\bar{Q}$.

Третий ответ является наиболее прямым и впечатляющим из всех. Мы начали с рассмотрения *мысленного* эксперимента по опустошению пространства. Как насчет реализации этой идеи на практике? Такие исследования велись на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (РКТИ) в Брукхейвенской национальной лаборатории (Лонг-Айленд), и эта работа будет продолжена на ускорителе БАК. Ученые ускоряют два больших набора кварков и глюонов, движущихся в противоположных направлениях, — в виде

* Для экспертов: они также распадаются при низких энергиях. — *Примеч. авт.*

тяжелых атомных ядер, например, золота или свинца — до очень высокой энергии, а затем сталкивают их. Это не очень хороший способ изучения основных, элементарных взаимодействий кварков и глюонов или поиска признаков новых физических явлений, поскольку одновременно происходит очень много таких столкновений. По сути, вы получаете небольшой, но очень горячий огненный шар. Были зафиксированы температуры свыше 10^{12} градусов (по Кельвину, Цельсию или Фаренгейту — на этом уровне вы можете выбрать любую шкалу). Это в миллиард раз горячее поверхности Солнца; такие высокие температуры последний раз достигались в пределах первой секунды после Большого взрыва. При таких температурах конденсат $Q\bar{Q}$ испаряется — «молекулы» кварк — антикварк, из которых он состоит, распадаются. Таким образом, небольшой объем пространства в течение короткого промежутка времени остается пустым. Затем по мере расширения и охлаждения огненного шара начинается наша реакция формирования пар и высвобождения энергии, и кварковый конденсат $Q\bar{Q}$ восстанавливается.

Все это произойдет почти наверняка. Тем не менее мы говорим «почти», поскольку то, что мы будем наблюдать, на самом деле будет представлять собой всяческие отходы, появившиеся в процессе охлаждения огненного шара. Рисунок 8.5 представляет собой фотографию того, как это выглядит. Очевидно, что фотография изначально не содержит окружностей и стрелок, указывающих, что отвечает за тот или иной результат. Полученное изображение требует интерпретации. В данном случае интерпретация является делом гораздо более сложным, чем в случае с изображениями внутренностей протонов и струй, которые мы обсуждали в главе 6. На сегодняшний день наиболее точные и полные интерпретации строятся в процессе плавления и переформирования кваркового конденсата $Q\bar{Q}$, который мы обсуждали ранее, однако мы еще не достигли устраивающего нас уровня ясности и убедительности. Ученые продолжают работу в плане как экспериментов, так и интерпретации.

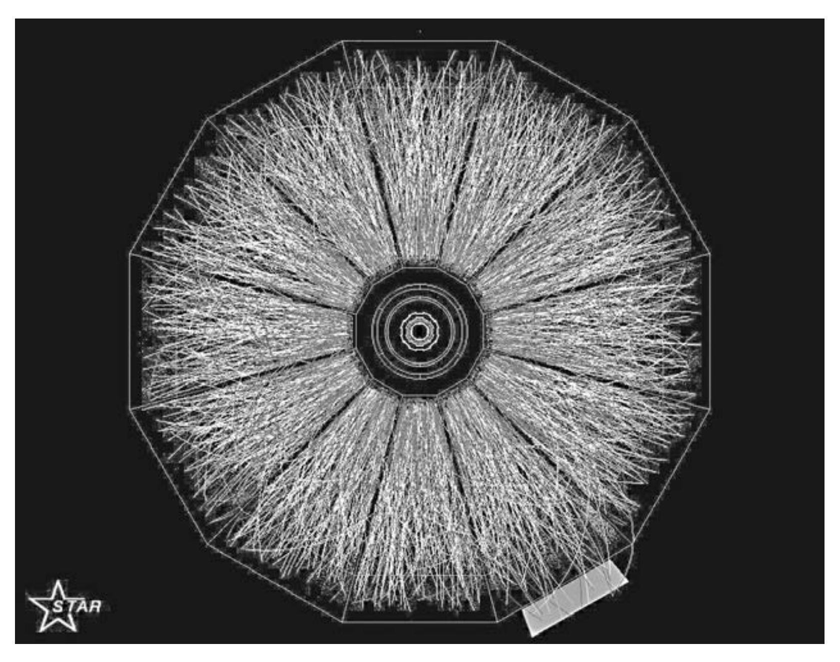


Рис. 8.5. Конечный результат столкновения тяжелых ионов — миниатюрная версия Большого взрыва

Для построения следующего уровня понимания конденсата у нас есть надежные косвенные доказательства его существования, но про его состав мы пока можем только гадать. Доказательства берутся из раздела фундаментальной физики, о котором мы до сих пор не упоминали, — из теории так называемого слабого взаимодействия*. У нас есть очень успешная теория слабого взаимодействия, которая шествовала от триумфа к триумфу с начала 1970-х годов. Следует отметить, что эта теория предсказала существование, массу и точные свойства *W*- и *Z*-бозонов до того, как они были обнаружены экспериментально. Обычно эта теория носит название «стандартной модели» или модели Вайнберга — Глэшоу — Салама, названной так в честь Стивена Вайнберга,

* Подробнее о слабом взаимодействии см. в глоссарии, главе 17 и приложении В. — *Примеч. авт.*

Шелдона Глэшоу и Абдуса Салама, трех теоретиков, которые сыграли ведущую роль в ее разработке (за что и получили Нобелевскую премию в 1979 году).

W- и *Z*-бозоны играют главную роль в стандартной модели. Они удовлетворяют уравнениям, очень похожим на уравнения для глюонов в квантовой хромодинамике. Оба представляют собой симметричные расширения уравнений для фотонов в квантовой электродинамике (то есть уравнений Максвелла). Динамика полей *W*- и *Z*- бозонов отвечает за слабые взаимодействия в том же смысле, что и поведение фотонного поля отвечает за электромагнетизм, а цветных глюонных полей — за сильное взаимодействие.

Поразительное сходство между нашими фундаментальными теориями, касающимися на первый взгляд очень разных сил, намекает на возможность синтеза, в котором все они будут рассматриваться в качестве различных сторон некой всеобъемлющей структуры. Их различные симметрии могут быть подсимметриями по отношению к большей мастер-симметрии. Дополнительная симметрия позволяет уравнениям преобразовываться в самих себя большим количеством способов, то есть существует больше способов добиться «отличий без различий». Таким образом, это открывает новые возможности для установления связей между закономерностями, которые раньше казались не связанными между собой. Если наши фундаментальные уравнения описывают частичные закономерности, которые мы можем сделать более симметричными с помощью дополнений, то это наводит на мысль о том, что они *на самом деле могут быть* гранями более крупной, единой структуры. Антон Чехов говорил:

> *«Если в начале пьесы на стене висит ружье, то (к концу пьесы) оно должно выстрелить».*

Я повесил ружье объединения взаимодействий.

Возвращаясь к стандартной модели: *W*- и *Z*-бозоны являются привлекательными ведущими игроками, но они нуждаются

в помощи, чтобы сыграть роли, для которых предназначены. Предоставленные сами себе, в соответствии с определяющими их уравнениями, они не имели бы массы, подобно фотону и цветным глюонам. Тем не менее сценарий реальности требует того, чтобы они были тяжелыми. Это подобно тому, как если бы фея Динь-Динь была выбрана на роль Санта-Клауса. Чтобы фея смогла сыграть толстяка, мы должны были бы одеть ее в специальный костюм с тяжелыми накладками.

Физики знают, как провернуть этот трюк, то есть сделать так, чтобы W- и Z-бозоны приобрели массу. Мы так думаем. На самом деле Природа продемонстрировала нам, как это происходит. Моя жена, состоявшийся писатель и прекрасный советчик, дала мне список клишированных слов, которых следует избегать, в том числе: *«удивительный»*, *«поразительный»*, *«великолепный»*, *«захватывающий»*, *«экстраординарный»*, другие вы можете добавить сами. В основном я следую этому совету. Однако я должен сказать, что нахожу то, что собираюсь описать, удивительным, поразительным, великолепным, захватывающим и, да, экстраординарным.

Моделью, с помощью которой Природа демонстрирует нам, как частицы — переносчики взаимодействия становятся тяжелыми, является сверхпроводимость. Внутри сверхпроводников фотоны становятся массивными! Более подробное обсуждение этого вопроса можно найти в приложении Б, здесь описана только основная идея. Фотоны, как мы уже обсуждали, представляют собой движущиеся возмущения в электрических и магнитных полях. В сверхпроводнике электроны активно реагируют на электрические и магнитные поля. Попытки электронов восстановить равновесие настолько энергичны, что они оказывают своего рода сопротивление движению полей. Таким образом, вместо того, чтобы двигаться с обычной скоростью света, внутри сверхпроводника фотоны движутся медленнее. Они как бы приобретают инерцию. При изучении уравнений вы обнаруживаете, что замедленные

фотоны внутри сверхпроводника подчиняются тем же уравнениям движения, что и частицы с ненулевой массой.

Если бы вы были существом, обитающим внутри сверхпроводника, то вы бы воспринимали фотон как массивную частицу.

Теперь давайте применим обратную логику. Люди являются существами, наблюдающими в своей естественной среде обитания массивные фотоноподобные частицы — *W*- и *Z*-бозоны. Поэтому мы, люди, можем заподозрить, что мы живем внутри сверхпроводника. Разумеется, не того сверхпроводника, который практически без потерь проводит (электрический) заряд, имеющий важность для фотонов, а сверхпроводника для зарядов, имеющих важность для *W*- и *Z*-бозонов. Стандартная модель основана на этой идее; и, как мы уже говорили, стандартная модель очень успешно описывает реальность, в которой мы существуем.

Таким образом, мы приходим к мысли о том, что сущность, которую мы называем пустым пространством, представляет собой необычный вид сверхпроводника. Там, где есть сверхпроводимость, должен быть и проводящий материал. Наша необычная сверхпроводимость работает везде. И эта работа требует заполняющего пространство материального эфира.

Большой вопрос: что конкретно представляет собой этот материал? Что в космическом сверхпроводнике играет ту же роль, что и электроны в обычных сверхпроводниках?

К сожалению, это не может быть хорошо понимаемый нами материальный эфир $Q\bar{Q}$. На самом деле кварковый конденсат $Q\bar{Q}$ представляет собой необычный сверхпроводник правильного вида, и он *вносит* вклад в массы *W*- и *Z*-бозонов. Однако в количественном отношении этот вклад примерно в тысячу раз меньше, чем нужно.

Ни одна из известных в настоящее время форм материи не обладает подходящими свойствами. Поэтому мы действительно не знаем, что представляет собой этот новый материальный эфир.

Мы знаем, что он называется конденсатом Хиггса в честь Питера Хиггса, шотландского физика, который впервые высказал некоторые из этих идей. Простейшая возможность — по крайней мере, если вы приравниваете простоту к добавлению как можно меньшего количества деталей, — заключается в том, что конденсат Хиггса состоит из одной новой частицы, так называемой частицы Хиггса. Однако космический сверхпроводник может оказаться смесью из нескольких материалов. На самом деле, как говорилось ранее, мы уже знаем, что конденсат $Q\bar{Q}$ — это только малая часть истории. Как мы увидим позже, существуют веские основания полагать, что это целый новый мир частиц, готовый к тому, чтобы его открыли, и что некоторые из этих частиц входят в состав космического сверхпроводника, также известного как конденсат Хиггса.

На первый взгляд, наиболее перспективные теории* объединения взаимодействий предсказывают существование всех видов частиц, которые мы еще не наблюдали. Дополнительные конденсаты могли бы спасти положение. Новые конденсаты могут сделать нежелательные частицы очень тяжелыми так же, как конденсат Хиггса делает более тяжелыми *W*- и *Z*-бозоны, только в большей степени. Частицы с очень большой массой трудно наблюдать. Чтобы произвести их в качестве реальных частиц, требуется большая энергия, а значит, большие ускорители. Даже их косвенное влияние в качестве виртуальных частиц уменьшается.

Конечно, добавление новых объектов в уравнения только потому, что вы можете оправдать невозможность их наблюдения, являлось бы дешевой спекуляцией. Интересными объединенные теории поля делает то, что они объясняют наблюдаемые нами свойства мира, и, что еще лучше, предсказывают новые. Я говорил вам, что ружье заряжено.

---

* То есть те, которые я считаю наиболее перспективными. Мы будем обсуждать их в главах 17–21. — *Примеч. авт.*

Сущность, которую мы воспринимаем в качестве пустого пространства, представляет собой многослойный, разноцветный сверхпроводник. Какая удивительная, поразительная, великолепная, захватывающая и экстраординарная концепция!

Прародитель Сетки: метрическое поле

Вот цитата Эйнштейна, которую я приберег. В 1920 году он писал:

> *«Согласно общей теории относительности, пространство немыслимо без эфира; действительно, в таком пространстве не только было бы невозможно распространение света, но и не могли бы существовать масштабы и часы, и не было бы никаких пространственно-временных расстояний в физическом смысле слова».*

Эта цитата служит в качестве подходящего представления прародителя всей Сетки — метрического поля.

Давайте начнем с чего-нибудь простого и знакомого — с карты мира. Поскольку карты плоские, в то время как то, что они отображают — поверхность Земли — является (примерно) сферическим, очевидно, карты требуют интерпретации. Существует множество способов создать карту, представляющую геометрию поверхности, которую она описывает. Все используют одну и ту же базовую стратегию. Самое главное — наложить сетку координат для задания локальной геометрии. Если более конкретно, то на каждом маленьком участке карты вы определяете, какое направление соответствует северу, а какое — востоку (юг и запад, разумеется, будут противоположными направлениями). Вы также указываете в каждом направлении, какой интервал на карте соответствует миле — или километру, или световой миллисекунде, или любой другой единице — на Земле.

Например, на картах, основанных на стандартной проекции Меркатора, север соответствует вертикали, а восток — горизонтали.

Затем поверхность Земли можно вписать в прямоугольник. «Путешествуя по миру» с запада на восток, вы движетесь по горизонтали от одного края карты к другому вне зависимости от того, следуете вы по экватору или по полярному кругу. Поскольку протяженность экватора гораздо больше, чем протяженность полярного круга, карта на первый взгляд создает искаженное впечатление: полярные области кажутся гораздо большими, чем они есть на самом деле. Однако сетка позволяет вам определить расстояния правильно. В полярных областях вы должны использовать линейки большего размера! (Прямо на полюсах все становится очень странно. Вся верхняя граница карты соответствует одной точке на Земле, а именно Северному полюсу, а вся нижняя граница соответствует Южному полюсу.)

Вся информация, необходимая для восстановления геометрии поверхности Земли на основе карты, содержится в легенде карты*. Например, вот как вы можете указать, что карта описывает сферу. Сначала выберите точку на карте. Затем для каждого направления отмерьте фиксированное расстояние r от контрольной точки (следуя легенде) и установите точку. Места на карте, отмеченные точками, соответствуют всем местам на Земле, которые располагаются на расстоянии r от контрольной точки. Соедините точки. В общем случае, если ваша карта построена в проекции Меркатора, фигура, которую вы получите на карте, не будет похожа на круг, несмотря на то что она представляет собой круг на Земле. Тем не менее вы можете использовать эту карту для измерения длины окружности на Земле, которой соответствует данная фигура. И вы обнаружите, что эта длина будет меньше $2\pi r$. (Для экс-

* Технический момент: чтобы измерить длину пути в направлениях, отличных от местных направлений север — юг или запад — восток, вы разбиваете этот путь на маленькие шаги, применяете к каждому из них теорему Пифагора и складываете длины. Чем меньше шаги, тем точнее измерение. — *Примеч. авт.*

пертов: она будет равна $R \sin(2\pi r / R)$, где R — радиус Земли.) Если карта представляет плоскую поверхность, что может не быть очевидным, если вы используете искаженную сетку, то вы получите ровно $2\pi r$. Вы также можете обнаружить, что длина окружности превышает $2\pi r$. В этом случае вы понимаете, что ваша карта описывает седлообразную поверхность. Сферы, естественно, имеют положительную кривизну, плоские поверхности — нулевую, седлообразные — *отрицательную* кривизну.

Несмотря на значительное усложнение визуализации, те же идеи применимы и к трехмерному пространству. Вместо координатной сетки для описания геометрии на плоском листе можно рассмотреть координатные сетки, которые заполняют трехмерную область. Такие составные «карты» содержат (в виде слоев) своего рода двумерные карты, которые мы только что обсуждали, а также указания для совмещения этих слоев. Они описывают искривленные трехмерные пространства.

Поэтому вместо того, чтобы работать непосредственно со сложными трехмерными формами, которые (в лучшем случае) крайне сложно визуализировать, мы можем работать в обычном пространстве, используя координатные сетки. Работать с этими картами, не жертвуя какой-либо информацией.

Координатная сетка для описания локальной геометрии в научной литературе называется *метрическим полем*. Карты учат нас тому, что геометрия поверхностей или искривленных пространств большей размерности эквивалентна сетке, или полю, содержащему инструкции по локальному заданию направлений и измерению расстояний. Лежащее в основе «пространство» карты может представлять собой матрицу из точек или даже массив регистров в компьютере. При правильной координатной сетке, или метрическом поле, любая из этих абстрактных структур может хорошо представлять сложную геометрию. Картографы и мастера компьютерной графики являются экспертами в использовании этих возможностей.

Кроме того, мы можем добавить время. Специальная теория относительности говорит нам, что время для одного наблюдателя является смесью пространства и времени для другого наблюдателя, поэтому кажется естественным обращение с пространством и временем на одних и тех же основаниях. Для этого нам нужен четырехмерный массив. Координатная сетка, или метрическое поле, в каждой точке указывает, какие три направления должны рассматриваться в качестве пространственных направлений — вы можете назвать их «север», «восток» и «вверх», однако в случае создания карты открытого космоса эти названия могут показаться несколько причудливыми*, — а также стандарты длины в этих направлениях. Она также указывает, что другое направление соответствует времени, и задает правило для перевода длин карты в этом направлении в промежутки времени.

В общей теории относительности Эйнштейн использовал понятие искривленного пространства-времени для создания теории гравитации. Согласно второму закону Ньютона, тела движутся по прямой линии с постоянной скоростью, если только на них не действует какая-то сила. Общая теория относительности модифицирует этот закон, постулируя, что тела движутся по наиболее прямому из возможных путей через пространство-время (по так называемым геодезическим линиям). Когда пространство-время искривлено, даже самый прямой из возможных путей приобретает неровности и изгибы, поскольку ему приходится адаптироваться к изменениям в локальной геометрии. Учитывая все это, тела реагируют на метрическое поле. Эти неровности и изгибы в пространственно-временной траектории тела — выражаясь более прозаично, изменения в его направлении и скорости — в соответствии с общей теорией относительности предоставляют альтернативное и более точное описание эффекта, ранее известного как гравитация.

---

* Математики и физики обычно обозначают их x_1, x_2, x_3. — *Примеч. авт.*

Мы можем описать общую теорию относительности с помощью любой из двух математически эквивалентных идей: искривленного пространства-времени или метрического поля. Математики, мистики и специалисты в области общей теории относительности, как правило, предпочитают геометрическое описание ввиду его элегантности. Физики, обучавшиеся в эмпирической традиции физики высоких энергий и квантовой теории поля, в основном предпочитают идею метрического поля, поскольку она лучше соответствует тому, как мы (или наши компьютеры) выполняем конкретные вычисления. Что еще более важно, как мы скоро увидим: описание с помощью метрического поля делает теорию гравитации Эйнштейна больше похожей на другие успешные теории фундаментальной физики и, таким образом, облегчает работу над полностью интегрированным описанием всех законов. Как вы, вероятно, уже догадались, я придерживаюсь идеи метрического поля.

Выраженная в терминах метрического поля общая теория относительности напоминает полевую теорию электромагнетизма. В последней электрические и магнитные поля сгибают траектории электрически заряженных тел или тел, содержащих электрические токи. В общей теории относительности метрическое поле изгибает траектории тел, обладающих энергией и импульсом. Другие фундаментальные взаимодействия также напоминают электромагнетизм. В КХД траектории тел, являющихся переносчиками цветного заряда, изгибаются цветовыми глюонными полями; в случае слабого взаимодействия в игру вступают и другие виды заряда и полей; однако во всех случаях глубинная структура уравнений очень схожа.

На этом сходства не заканчиваются. Электрические заряды и токи влияют на силу ближайших электрических и магнитных полей, то есть их среднюю силу без учета квантовых флуктуаций. Это «реакция» полей, соответствующая их «воздействию» на

заряженные тела. Аналогичным образом на силу метрического поля влияют все тела, обладающие энергией и импульсом (то есть все известные формы материи). Таким образом, наличие тела А влияет на метрическое поле, которое, в свою очередь, влияет на траекторию другого тела Б. Так общая теория относительности учитывает явление, ранее известное как сила тяжести, с которой одно тело действует на другое. Это оправдывает интуитивное неприятие Ньютоном дальнодействия, несмотря на то что развенчивает его теорию.

Для обеспечения последовательности метрическое поле должно быть *квантовым*, как и другие. То есть оно должно спонтанно флуктуировать. У нас нет удовлетворительной теории для этих флуктуаций. Мы знаем, что эффекты квантовых флуктуаций в метрическом поле обычно — а судя по нашему существующему опыту, всегда — на практике малы просто потому, что мы получаем очень успешные теории, игнорируя их! Начиная с тонкой биохимии, продолжая необычными опытами на ускорителях и заканчивая эволюцией звезд и первыми моментами после Большого взрыва, мы могли делать точные предсказания и получали их подтверждения, игнорируя при этом возможные квантовые флуктуации в метрическом поле. Кроме того, современная система GPS строит карту в пространстве и времени непосредственно. Она не учитывает квантовую гравитацию, но работает очень хорошо. Экспериментаторы усердно трудились над обнаружением *хоть какого-то* эффекта, который можно было быть приписать квантовым флуктуациям в метрическом поле, другими словами, — квантовой гравитации. Нобелевские премии и вечная слава ждут тех, кто сделает это открытие. До сих пор этого не произошло*.

Тем не менее возражение «Это работает на практике, а как насчет теории?» по-прежнему имеет место. Возникающая про-

---

* Однако в примечаниях я упомянул о многообещающей возможности. — *Примеч. авт.*

блема очень похожа на проблемы кварковой модели, особенно партонной, обсуждаемой в главе 6. Беспокойство по поводу тех теоретических проблем в конечном счете привело к концепции асимптотической свободы и полной, чрезвычайно успешной теории кварков и (недавно предсказанных!) цветных глюонов. Аналогичная задача для квантовой гравитации не решена. Теория суперструн является доблестной попыткой, однако очень многое в ней находится в стадии разработки. В настоящее время она больше похожа на набор подсказок относительно того, как эта теория может выглядеть, чем на конкретную картину мира с конкретными алгоритмами и предсказаниями. Кроме того, она не учитывает основные идеи Сетки. (Для экспертов: полевая теория струн является в лучшем случае неуклюжей.)

В цитате Эйнштейна, приведенной в начале данного раздела, говорилось о том, что пространство-время без метрического поля «немыслимо». Если воспринимать эту фразу буквально, то она, очевидно, ложна, поскольку мыслить его очень легко! Давайте вернемся к нашей карте, например. Если координатная сетка будет удалена или потеряна, карта все равно сможет нам многое рассказать. Она просто точно не скажет нам о форме и размере изображенных на ней вещей. Однако даже без сведений о размере и форме мы имеем то, что называется топологической информацией. Это по-прежнему дает много пищи для размышлений.

Эйнштейн имел в виду, что без метрического поля трудно представить, как будет функционировать физический мир. Свет не будет знать, в какую сторону двигаться или с какой скоростью; линейки и часы не будут знать, что они должны измерять. Уравнения, которые Эйнштейн вывел для света и материалов, из которых вы могли бы изготовить линейки и часы, не могут быть сформулированы без метрического поля.

Верно! Однако в современной физике есть множество вещей, которые трудно себе представить. Мы должны позволить нашим концепциям и уравнениям указывать нам путь. То, что сказал об

этом Герц, настолько важно (и так хорошо выражено), что это стоит повторить:

> *«Трудно отделаться от ощущения, что эти математические формулы существуют независимо от нас и обладают своим собственным разумом, что они умнее нас, умнее тех, кто открыл их, и что мы извлекаем из них больше, чем было в них первоначально заложено».*

Другими словами, наши уравнения — и в более общем смысле наши концепции — это не только наши произведения, но и наши учителя.

В этом отношении открытие того, что Сетка заполнена несколькими видами материалов, или конденсатами, поднимает очевидный вопрос: является ли метрическое поле конденсатом? Может ли он состоять из чего-то более фундаментального? И этот вопрос поднимает другой: могло ли метрическое поле, вроде кваркового конденсата $Q\bar{Q}$, испариться во время возникновения Вселенной, в самые первые моменты после Большого взрыва?

Положительный ответ предоставил бы новый способ решения вопроса, который мучил Августина Блаженного: «Что делал Бог *до того*, как Он создал мир?» (Подтекст: Чего Он ждал? Не лучше было бы начать пораньше?) Августин Блаженный дал два ответа на эти вопросы.

Первый ответ: перед тем как создать мир, Бог готовил ад для людей, которые задают глупые вопросы.

Второй ответ: пока Бог не сотворил мир, никакого «прошлого» нет. Так что этот вопрос не имеет смысла.

Его первый ответ смешнее, однако второй, подробно прописанный в главе 10 его сочинения «Исповедь», является более интересным. Основной аргумент Августина заключается в том, что прошлое больше не существует, а будущее еще не существует; собственно говоря, есть только настоящее. Однако прошлое в некотором роде существует в сознании в качестве памяти (конечно,

как и будущее — в качестве ожидания). Таким образом, существование прошлого зависит от наличия сознания, а в отсутствие сознания не может быть никакого «прежде». До возникновения сознания не было никакого «прежде»!

Современная светская версия вопроса Августина звучит так: «Что случилось до Большого взрыва?» И мы могли бы применить версию его второго ответа, основанную на физике. Не то чтобы сознание необходимо для существования времени — я не думаю, что многие физики согласятся с этим (уравнения физики с этим точно не согласятся). Однако если метрическое поле испаряется, с ним исчезает и стандартное время. А когда не существует никаких *часов* — не только сложных устройств для хронометража, но любого физического процесса, который мог бы служить для обозначения времени, само время и само понятие «прежде» теряет всякий смысл. Поток времени начинается с конденсации метрического поля.

Может ли метрическое поле измениться каким-либо другим способом (кристаллизоваться?) под давлением, например, вблизи центра черной дыры? (Мы знаем, что под давлением кварки образуют странные конденсаты с такими забавными названиями, как сверхпроводник запертого цветного аромата, которые отличаются от конденсата $Q\bar{Q}$.)

Может ли более фундаментальный материал, из которого состоит метрическое поле, быть тем самым материалом, который нам нужен для объединения различных взаимодействий?

Я надеюсь, вы согласитесь, что это отличные вопросы! К сожалению, у нас пока нет достойных ответов на них. (Я работаю над этим...) Однако то, что мы можем формулировать вопросы и всерьез задумываться о возможностях, которые Эйнштейн считал «немыслимыми», является признаком нашего прогресса и возросших амбиций. Теперь у нас есть более совершенные уравнения и богатые концепции, и мы позволяем им вести нас.

Сетка имеет вес

Традиционно масса считалась определяющим свойством материи — свойством, которое делает вещество вещественным. Таким образом, недавнее астрономическое открытие того, что Сетка имеет вес, того, что сущность, которую мы воспринимаем в качестве пустого пространства, обладает универсальной, ненулевой плотностью, венчает доказательство ее физической реальности. Несмотря на то что это несколько отходит от главной темы данной книги, я выделю несколько ее страниц на обсуждение природы этого открытия и его космологических последствий, поскольку это является принципиально важным и чрезвычайно интересным*.

Понятие плотности Сетки, по сути, соответствует космологической постоянной Эйнштейна, которая, в свою очередь, соответствует «темной энергии». Существуют некоторые различия в интерпретации и акцентах, которые я буду объяснять по мере того, как мы будем их касаться, однако все три термина относятся к одному и тому же физическому явлению.

В 1917 году Эйнштейн ввел поправку в уравнения, которые он двумя годами ранее предложил для общей теории относительности. Его мотивацией была космология. Эйнштейн считал, что Вселенная обладает постоянной плотностью, как во времени, так и (в среднем) в пространстве, поэтому он хотел найти решение с этими свойствами. Однако, когда он применил свои изначальные уравнения ко Вселенной в целом, он не смог найти такое решение. Лежащую в основе этого проблему легко понять. Ее предвидел еще Ньютон в 1692 году в знаменитом письме к Ричарду Бентли:

> *«Мне кажется, что если бы все вещество нашего Солнца и планет и все вещество Вселенной было бы равномерно распределено в небесах,*

---

* Чтобы не слишком усложнять повествование, я отложил описание очень интересного астрономического открытия — темной материи. Мы коснемся этой темы позднее. — *Примеч. авт.*

и если бы каждая частица имела врожденное тяготение ко всем остальным, и если бы пространство, в котором была бы рассеяна эта материя, было конечным, то вещество снаружи этого пространства благодаря своему тяготению стремилось бы ко всему веществу внутри и вследствие этого сконцентрировалось бы в середине всего пространства и образовало бы там одну огромную сферическую массу. Однако если бы это вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, оно никогда не смогло бы объединиться в одну массу, но одна часть его сгущалась бы в одну массу, а другая — в другую...»

Проще говоря, сила тяжести является универсальной силой притяжения, поэтому она не позволяет вещам существовать по отдельности. Сила тяжести все время старается собрать их вместе. Поэтому неудивительно, что вы не можете найти решение, в котором Вселенная поддерживает постоянную плотность.

Чтобы получить нужное решение, Эйнштейн изменил уравнения. Однако он изменил их очень специфическим способом, который не испортил их лучшую характеристику, а именно, описание гравитации в соответствии со специальной теорией относительности. По сути, существует только один способ это сделать. Эйнштейн назвал добавленный в уравнения для гравитации член «космологическим членом». На самом деле он не предлагал его физической интерпретации, однако современная физика предоставила отличную интерпретацию, о которой мы поговорим далее.

Мотивация Эйнштейна для добавления космологического члена, необходимого для описания статической Вселенной, вскоре устарела, когда в 1920-е годы в основном благодаря работе Эдвина Хаббла появились свидетельства расширения Вселенной. Эйнштейн называл идеи, которые не позволили ему предсказать расширение Вселенной, своим «величайшим промахом». (И это действительно был промах, поскольку созданная им модель Вселенной даже с новыми уравнениями являлась нестабильной. Строго однородная плотность является решением, однако любое малое

нарушение однородности со временем увеличивается). Тем не менее выявленная им возможность добавления нового члена в уравнения общей теории относительности без ее ухудшения оказалась пророческой.

Космологический член можно рассматривать двумя способами. Выражения $E = mc^2$ и $m = E / c^2$ математически эквивалентны, но они предполагают различные интерпретации. Эйнштейн рассматривал его в качестве модификации закона тяготения. Кроме того, этот член также можно рассматривать как эффект наличия постоянной плотности массы, а также постоянного давления во всем пространстве и во все времена. Поскольку эта масса-плотность и давление повсюду имеют одинаковое значение, они могут рассматриваться в качестве свойства, внутренне присущего самому пространству. Эта точка зрения соответствует концепции Сетки. Если мы примем как данность то, что пространство обладает этими свойствами, и сосредоточимся исключительно на последствиях, связанных с гравитацией, то мы вернемся к воззрению Эйнштейна.

Ключевое отношение, регулирующее физику космологического члена, соотносит его плотность ρ с давлением p, которое он оказывает, используя скорость света c. Для этого уравнения нет стандартного названия, однако оно бы нам не помешало. Я буду называть его хорошо темперированным уравнением, поскольку оно предписывает правильный способ настройки Сетки. Хорошо темперированное уравнение выглядит так:

$$\rho = -p / c^2.$$

Откуда оно взялось? Что оно значит?

Хорошо темперированное уравнение выглядит как мутировавший клон второго закона Эйнштейна, $m = E / c^2$: m превратилось в ρ, а E — в p, там, правда, еще есть знак «–», однако сходство очевидно. И на самом деле они глубоко связаны между собой.

Второй закон Эйнштейна связывает энергию изолированного тела в состоянии покоя с его массой (см. главу 3 и приложение А). Это является следствием специальной теории относительности, хотя и не сразу очевидным. На самом деле о нем не упоминалось в первой работе Эйнштейна по теории относительности; он написал отдельную заметку об этом позднее.

Хорошо темперированное уравнение также является следствием специальной теории относительности, однако применяемой теперь к однородной заполняющей пространство сущности, а не к изолированному телу. Не сразу становится ясно, как ненулевая плотность Сетки может согласовываться со специальной теорией относительности. Чтобы оценить эту проблему, подумайте о знаменитом сокращении Фицджеральда — Лоренца, которое мы упомянули в главе 6. Наблюдателю, движущемуся с постоянной скоростью, объекты кажутся сжатыми в направлении движения. Таким образом, можно было бы подумать, что движущийся наблюдатель видит более высокую плотность Сетки. Это противоречит буст-симметрии теории относительности, в соответствии с которой для этого наблюдателя должны действовать те же самые физические законы.

Давление, которое сопровождает плотность, согласно хорошо темперированному уравнению дает лазейку. Весы движущегося наблюдателя в соответствии с уравнениями специальной теории относительности регистрируют новую плотность, которая представляет собой смесь прежней плотности и прежнего давления, подобно тому как его часы регистрируют временные интервалы, которые представляют собой смесь прежних временных и прежних пространственных интервалов. Если — и только если — прежняя плотность и прежнее давление связаны именно так, как это предписывается хорошо темперированным уравнением, значения новой плотности (и нового давления) будут равны прежним значениям.

Другое, тесно связанное с вышеописанным, следствие хорошо темперированного уравнения имеет центральное значение для космологии плотности Сетки. В расширяющейся Вселенной плотность материи любого нормального вида будет уменьшаться. Однако плотность хорошо темперированной Сетки остается неизменной! Если вы хотите выполнить небольшое упражнение из начального курса физики и алгебры, вот довольно симпатичное соотношение, связывающее это постоянство плотности непосредственно со вторым законом Эйнштейна. (Если нет, просто пропустите следующий абзац.)

Рассмотрим объем пространства V, заполненный плотностью Сетки ρ. Пусть объем увеличится на δV. Обычно по мере того, как тело расширяется под давлением, оно совершает работу, следовательно, теряет энергию. Однако знак «–» в уравнении для хорошо темперированной Сетки дает нам *отрицательное* давление $p = -\rho c^2$. Таким образом, в процессе расширения наша хорошо темперированная Сетка *приобретает* энергию $\delta V \times \rho c^2$. Следовательно, согласно второму закону Эйнштейна, ее масса возрастает на $\delta V \times \rho$. И этого как раз достаточно для заполнения добавившегося объема δV плотностью ρ, что позволяет Сетке поддерживать постоянство ее плотности.

Каждый из описанных ранее компонентов Сетки — разнообразные флуктуирующие квантовые поля, кварковый конденсат $Q\bar{Q}$, конденсат Хиггса, конденсат объединения-сохранения (unification-salvaging condensate), пространственно-временное метрическое поле (или конденсат?) — является хорошо уравновешенным. Каждая из этих заполняющих пространство сущностей подчиняется хорошо темперированному уравнению, поскольку все они согласуются с буст-симметрией специальной теории относительности.

Можно отдельно измерить космическую плотность и давление, используя совершенно другие способы. Плотность влияет на ис-

кривление пространства, которое астрономы могут измерить, изучая обусловленные этой кривизной искажения в изображениях далеких галактик или используя мощную новую технику, связанную с изучением космического микроволнового фонового излучения. С помощью новой техники к 2001 году нескольким группам удалось доказать, что во Вселенной содержится намного больше массы, чем может быть приписано только обычной материи. Около 70 % от общей массы, по-видимому, очень равномерно распределено в пространстве и во времени.

Давление влияет на скорость расширения Вселенной. Эта скорость может быть измерена путем изучения далеких сверхновых. Их яркость говорит, как далеко они находятся, а красное смещение их спектральных линий сообщает, насколько быстро они удаляются от нас. Поскольку скорость света конечна, наблюдая дальние сверхновые, мы видим их прошлое. Таким образом, мы можем использовать сверхновые, чтобы восстановить историю расширения Вселенной. В 1998 году две команды наблюдателей-энтузиастов сообщили, что скорость расширения Вселенной увеличивается. Это было большой неожиданностью, поскольку обычное гравитационное притяжение имеет тенденцию сдерживать расширение. Обнаруживались некоторые новые эффекты. Простейшим объяснением является универсальное отрицательное давление, способствующее расширению.

Термин *«темная энергия»* стал обобщающим для обоих этих открытий — дополнительной массы и ускоряющегося расширения. Он не должен был предусматривать точных относительных значений плотности и давления. Если бы мы просто назвали оба этих значения космологическим членом, это бы означало, что мы предугадываем их относительные величины. Однако, по-видимому, мы бы оказались правы. Две очень разные величины — космическая плотность массы и космическое давление, наблюдаемые разными способами, — действительно кажутся связанными соотношением $\rho = -p / c^2$.

Является ли астрономическое открытие того, что пространство имеет вес и, по-видимому, подчиняется хорошо темперированному уравнению, блестящим подтверждением существования глубинных структур, на основе которых мы строим наши лучшие картины мира? И да и нет. Если честно, то, наверное, мне следует написать и $_{\text{да}}$ и НЕТ.

Проблема заключается в том, что определенная астрономами суммарная плотность гораздо, гораздо меньше приблизительных значений любого из наших конденсатов. Далее приведены приблизительные значения плотностей в виде кратных тому, что обнаружили астрономы:

- конденсат, состоящий из пар «кварк — антикварк» — 10^{44};
- слабый сверхпроводящий конденсат — 10^{56};
- единый сверхпроводящий конденсат — 10^{112};
- квантовые флуктуации без суперсимметрии — ∞;
- квантовые флуктуации с суперсимметрией* — 10^{60};
- пространственно-временная метрика — ? (В данном случае физика слишком туманна для приблизительных оценок.)

Если бы какое-либо из этих приблизительных значений было правильным, то эволюция Вселенной происходила бы гораздо более быстрыми темпами по сравнению с тем, что мы наблюдаем.

Почему реальная плотность пространства намного меньше? Может быть, среди этих и каких-то других компонентов существует заговор и, возможно, некоторые значения являются отрицательными, что и дает в общей сложности намного меньшее совокупное значение по сравнению с вкладом каждого отдельного компонента. Может быть, существует серьезный пробел в нашем

---

* Мы будем подробно обсуждать суперсимметрию далее в связи с объединением сил. Сейчас главное — понять, что она делает неимоверно большой вклад в плотность, как и все остальное. — *Примеч. авт.*

пониманиии того, как сила тяжести реагирует на плотность Сетки. Возможно, и то и другое. Мы не знаем.

До открытия темной энергии большинство физиков-теоретиков, глядя на огромное несоответствие приблизительных оценок плотности пространства реальным данным, надеялись на то, что какая-нибудь блестящая догадка хорошо объяснит, почему правильный ответ равен нулю. Аргумент Фейнмана «потому что там ничего нет» был лучшей или по крайней мере самой занятной идеей из всех, что мне встречались. Если ответ на самом деле не равен нулю, требуются другие объяснения. (Логически по-прежнему возможно, что конечная плотность равна нулю и что Вселенная очень медленно стремится к этому значению.)

В настоящее время популярным предположением является то, что множество различных конденсатов делают вклад в суммарную плотность, некоторые положительный, а некоторые — отрицательный. Только тогда, когда вклады почти полностью компенсируют друг друга, можно получить хорошую, медленно развивающуюся Вселенную, которая довольно понятна для наблюдателя. Наблюдаемая Вселенная должна предусмотреть достаточно времени для возникновения потенциальных наблюдателей. Таким образом, в соответствии с этой точкой зрения мы наблюдаем невероятно малую суммарную плотность Сетки потому, что если бы эта плотность была значительно больше, то не было бы никого, кто мог бы ее наблюдать. Может быть, и так, однако эту идею нельзя уточнить или проверить. Иногда мы можем использовать неопределенность для достижения точности, собирая множество образцов. Мы делаем это при создании таблиц страховых выплат или при применении квантовой механики. Однако в случае Вселенной у нас есть лишь один образец.

Так или иначе, в наблюдаемой нами Вселенной Сетка имеет вес. К счастью, чтобы прийти к этому заключению, одной Вселенной вполне достаточно.

Подведение итогов

В начале этой главы я перечислил ключевые свойства Сетки — материала, который лежит в основе физической реальности:

- Сетка заполняет пространство и время;
- каждый фрагмент Сетки — каждый элемент пространства-времени — имеет те же основные свойства, что и любой другой фрагмент;
- Сетка оживлена квантовыми процессами. *Квантовые* процессы обладают особыми характеристиками. Они спонтанны и непредсказуемы. И для их наблюдения необходимо обеспечить возмущение;
- Сетка также содержит прочные материальные компоненты. Космос представляет собой многослойный, многоцветный сверхпроводник.
- Сетка содержит метрическое поле, которое обусловливает пространственно-временную жесткость и гравитацию.
- Сетка имеет вес и универсальную плотность.

А теперь, после презентации товара, я надеюсь, что вы его купите!

Глава 9. Вычисляющая материя

Все создается игрой битов.

Джон Уилер обладает даром облекать глубокие идеи в броские фразы. «Черная дыра», вероятно, его самое известное творение, однако моим любимым является выражение «все из бита». В этих трех словах заключен вдохновляющий идеал для теоретической науки. Мы стремимся найти математические структуры, которые отражают реальность настолько полно, что ни один важный аспект не остается неучтенным. Решение уравнений говорит нам о том, что существует и как оно себя ведет. Благодаря достижению такого соответствия мы помещаем реальность в форму, которой можем манипулировать в своем сознании.

Философы-реалисты утверждают, что материя первична, мозг (сознание) состоит из материи, а концепции возникают благодаря работе мозга. Идеалисты утверждают, что концепции являются первичными, сознание является концептуальным механизмом, а концептуальные механизмы создают материю. Согласно доктрине «все из бита», нам не обязательно делать выбор между этими альтернативами. Они обе могут быть истинными одновременно. Они говорят об одном и том же, но на разных языках.

Главный вызов, стоящий перед подходом «все из бита», заключается в нахождении математических структур, которые отражают сознательный опыт и гибкий интеллект, словом, в создании думающих компьютеров. Это еще не достигнуто, и люди до сих пор спорят, возможно ли такое*.

Наиболее впечатляющее достижение подхода «все из бита» я описал в данной главе. Алгоритмы КХД позволяют нам запрограммировать компьютеры на производство огромного количества протонов, нейтронов и всей пестрой компании сильно взаимодействующих частиц. Вот уж воистину, все из бита!

В качестве бонуса мы получили эффект, выражаемый другим афоризмом Уилера: «масса без массы». Строительными блоками протонов и нейтронов, как показали результаты описанных в главе 6 экспериментов, являются строго безмассовые глюоны и почти безмассовые кварки. (Вес соответствующих кварков, u и d, составляет около 1 % от веса образуемых ими протонов.)

В Брукхейвенской национальной лаборатории на Лонг-Айленде, а также в ряде других центров по всему миру есть специальные комнаты, куда редко заходят люди. Кажется, что в этих комнатах не происходит ничего особенного, там нет никакого видимого движения, только тихий шум вентиляторов, которые поддерживают стабильную температуру и низкий уровень влажности. В этих комнатах работают около 10^{30} протонов и нейтронов. Они организованы в сотни работающих параллельно компьютеров. Их производительность измеряется терафлопами, что соответствует 10^{12} (миллион миллионов) операций в секунду (флопс). Мы позволяем им работать в течение месяцев — 10^7 секунд. К концу этого периода им удается то, что один протон делает каждые 10^{-24} секунды, то есть вычислить, как наилучшим образом следует организовать кварковые и глюонные поля, чтобы они поддерживали стабильность Сетки и обеспечивали устойчивое равновесие.

* Конечно, это возможно. — *Примеч. авт.*

Почему это так трудно?

Сетка — суровая дама.

Если точнее, то она очень сложна. У нее много настроений, и они часто меняются.

Квантовая механика работает с волновыми функциями, которые представляют собой множество возможных конфигураций полей, а наши классические компьютеры могут обрабатывать только одну конфигурацию за один раз. Для имитации взаимодействия многих конфигураций, которые в квантовом описании присутствуют одновременно, классический компьютер должен делать следующее.

1. Производить вычисления в течение длительного времени для создания этих конфигураций.
2. Хранить их.
3. Соотносить свои старые данные с текущим содержимым.

В сущности, в данном случае цель не оправдывает средства. Если квантовые компьютеры станут доступны, мы окажемся в лучших условиях. Более того, то, что мы пытаемся вычислить — наблюдаемые частицы, — создают лишь небольшую рябь в бурном море флуктуирующей Сетки. Для нахождения числовых характеристик частиц мы должны моделировать все море, а затем выискивать небольшие возмущения.

Игрушечная модель в тридцати двух измерениях

Когда я был маленьким, мне нравилось собирать и разбирать пластиковые модели ракет. Эти модели не могли доставлять спутники на орбиту, не говоря уже о том, чтобы доставить кого-нибудь на Луну. Однако это были вещи, которые я мог держать в руках и с которыми мог играть, а еще они развивали мое воображение. Они были построены в масштабе, и к ним прилагался маленький пластиковый человечек в том же масштабе, что позволяло мне оценить

соотношение размеров, понять разницу между перехватчиком и ракетой-носителем, а также разобраться с некоторыми ключевыми понятиями вроде полезной нагрузки и съемных ступеней. Игрушечные модели могут быть интересными и полезными.

Аналогичным образом, для понимания сложных концепций или уравнений могут пригодиться игрушечные модели. Хорошая игрушечная модель создает некоторое представление о реальной вещи, но является достаточно небольшой, чтобы мы могли охватить ее своим сознанием.

В следующих нескольких абзацах я покажу вам игрушечную модель квантовой реальности. Это очень упрощенная модель, но я считаю, что она достаточно сложна, чтобы передать обширность того, что она представляет. Суть в том, что квантовая реальность является ОЧЕНЬ, ОЧЕНЬ БОЛЬШОЙ*. Мы создадим игрушечную модель, которая описывает жизнь спинов всего пяти частиц, и обнаружим, что она заполняет пространство 32 измерений.

Начнем с одной квантовой частицы, которая имеет минимальную величину спина. Мы абстрагируемся от всех остальных ее свойств (то есть игнорируем их). Полученный объект называется квантовым битом или кубитом. (Для экспертов: холодный электрон, захваченный в определенном пространственном состоянии, например, с помощью подходящих электрических полей, по сути, является кубитом.) Спин кубита может быть направлен по-разному. Мы напишем:



для состояния, когда спин кубита определенно направлен вверх, и:



для состояния, когда спин кубита определенно направлен вниз.

* Если вы готовы поверить мне на слово и предпочитаете избежать сложных деталей, можете сразу перейти к разделу «Большая числодробилка». — *Примеч. авт.*

Кубит также может находиться в состояниях, при которых спин направлен в сторону, и именно здесь начинается все самое интересное. Именно здесь, на данном этапе проявляется основная странность квантовой механики.

Состояния, когда спин направлен в сторону, *не являются* новыми, независимыми. Эти и все другие состояния кубита представляют собой комбинации состояний $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, которые у нас уже есть. Например, состояние, при котором спин направлен на восток, выражается так:

$$|\rightarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\rangle.$$

Состояние, в котором спин определенно указывает на восток, представляет собой смесь из равных частей северного и южного направлений. При измерении спина в горизонтальном направлении вы всегда будете обнаруживать, что он указывает на восток. Однако если вы измеряете спин в вертикальном направлении, вы с равной вероятностью обнаруживаете, что он указывает либо на север, либо на юг. В этом и заключается смысл этого странного уравнения. Если более подробно, то правило для вычисления вероятности обнаружения определенного результата (спин вверх или спин вниз) при измерении спина в вертикальном направлении заключается в возведении в квадрат множителя, который стоит перед этим состоянием. В данном случае, например, число $1/\sqrt{2}$ умножает состояние «спин вверх», поэтому вероятность обнаружения состояния «спин вверх» составляет $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$.

Этот пример в миниатюре иллюстрирует компоненты, которые участвуют в описании физической системы, согласно квантовой теории. Состояние системы описывается ее волновой функцией. Вы только что видели волновые функции для трех конкретных состояний. Волновая функция состоит из набора чисел, умножаемых на каждую возможную конфигурацию описываемого объекта. (Это число может быть равно нулю, поэтому, если придираться,

мы могли бы написать $|\uparrow\rangle = 1\,|\uparrow\rangle + 0\,|\downarrow\rangle$.) Число, на которое умножается конфигурация, называется *амплитудой вероятности* для этой конфигурации. *Квадрат* амплитуды вероятностей соответствует вероятности наблюдения этой конфигурации.

А как насчет состояния, при котором спин направлен на запад? В силу симметрии это состояние должно иметь равные вероятности для спина вверх и для спина вниз. Однако оно должно отличаться от состояния, при котором спин направлен на восток. Вот как оно выражается:

$$|\leftarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\rangle.$$

Дополнительный знак «–» не влияет на вероятность, поскольку мы возводим число в квадрат. Для восточного и западного направления вероятности одинаковы, однако амплитуды вероятности различны. (Далее мы увидим, к каким последствиям на самом деле приводит знак «–», когда мы будем рассматривать несколько спинов сразу.)

Теперь давайте рассмотрим два кубита. Чтобы получить состояние, при котором оба спина направлены на восток, мы умножаем две копии состояния «спин на восток» и находим:

$$|\rightarrow\rightarrow\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow\uparrow\rangle + \frac{1}{2}|\uparrow\downarrow\rangle + \frac{1}{2}|\downarrow\uparrow\rangle + \frac{1}{2}|\downarrow\downarrow\rangle.$$

Вероятность наблюдения состояния, при котором оба спина направлены вверх, равна $(1/2)^2 = 1/4$, как и вероятность состояния «первый спин вверх», «второй спин вниз» и т. д. Аналогичным образом, когда оба спина направлены на запад, мы получаем:

$$|\leftarrow\leftarrow\rangle = \frac{1}{2}|\uparrow\uparrow\rangle - \frac{1}{2}|\uparrow\downarrow\rangle - \frac{1}{2}|\downarrow\uparrow\rangle + \frac{1}{2}|\downarrow\downarrow\rangle.$$

Опять же все вероятности обнаружения спинов, направленных вверх и вниз, равны.

Используя только эти два кубита, мы обнаруживаем поистине странное поведение (выражаясь техническим языком, *запутанное*). Давайте объединим состояние, в котором оба спина направлены на восток, с состоянием, в котором оба направлены на запад. Это можно сделать двумя способами:

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\rightarrow\rightarrow\rangle+\frac{1}{\sqrt{2}}|\leftarrow\leftarrow\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\uparrow\rangle+\frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\downarrow\rangle \qquad (9.1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|\rightarrow\rightarrow\rangle-\frac{1}{\sqrt{2}}|\leftarrow\leftarrow\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow\downarrow\rangle+\frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow\uparrow\rangle \qquad (9.2)$$

В каждом из этих состояний смысл выражений в левой части уравнения заключается в том, что при измерении спинов в *горизонтальном* направлении мы обнаруживаем: либо оба указывают на восток, либо оба указывают на запад. Каждая из этих возможностей реализуется с вероятностью 1/2. Мы никогда не обнаружим, что один спин указывает на восток, а другой — на запад. Поэтому, когда речь идет об измерениях в горизонтальном направлении, эти два состояния выглядят одинаково. Это все равно, как если бы вы знали, что у вас есть пара носков — либо черных, либо белых, но при этом вы бы не знали, какого именно они цвета. В этом заключается смысл выражений в левой части этих уравнений.

Выражения в правой части сообщают вам, что произойдет, если вы измерите в этих же состояниях оба спина в вертикальном направлении. В этом случае результаты будут совершенно другими. В первом состоянии оба спина будут направлены либо вверх, либо вниз; каждая из этих возможностей может реализоваться с вероятностью 1/2. Второе состояние в рассмотренном выше случае выглядело так же, как первое. Теперь, с другой точки зрения, оно максимально отличается от первого. Во втором состоянии вы

никогда не обнаружите, что спины указывают в одном и том же вертикальном направлении: если один направлен вверх, то другой направлен вниз.

Любое из этих состояний вызвало бы недовольство Эйнштейна, Подольского и Розена, поскольку те демонстрируют суть знаменитого ЭПР-парадокса. Измерение спина первого кубита говорит вам о результате, который вы получите, измерив спин второго кубита, на каком бы расстоянии друг от друга они ни находились. На первый взгляд кажется, что это «жуткое действие на расстоянии», как его называл Эйнштейн, способно передавать информацию (то есть сообщить второму спину, куда он должен указывать) со скоростью, превышающей скорость света. Однако это иллюзия, поскольку для того, чтобы два кубита пришли в некоторое конечное состояние, изначально они должны находиться очень близко друг к другу. Позднее мы можем поместить их далеко друг от друга, однако если кубиты не могут двигаться быстрее скорости света, то этого не может и сообщение, переносчиками которого они являются.

В более общем смысле для конструирования всех возможных состояний двух кубитов мы суммируем четыре возможности $|\uparrow\uparrow\rangle$, $|\uparrow\downarrow\rangle$, $|\downarrow\uparrow\rangle$, $|\downarrow\downarrow\rangle$, каждая из которых умножается на отдельное число. Это определяет четырехмерное пространство, в котором вы можете передвигаться в четырех различных направлениях.

Описание возможных состояний пяти кубитов подразумевает выбор между вариантами направления вверх и вниз для каждого из них (например, $|\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\rangle$ или $|\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\rangle$). Существует $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32$ вероятности, а общее состояние может состоять из вкладов всех состояний, каждый из которых умножается на некоторое число. Вот откуда у нас появляется игрушечная 32-мерная модель. Ничего себе игрушка!

Демон Лапласа и пандемониум Сетки

Шедевр Пьера-Симона Лапласа, пятитомное сочинение «Небесная механика», выходил отдельными выпусками в период с 1799 по 1825 год. Оно перевело математическую астрономию, основанную на ньютоновских принципах, на качественно новый уровень элегантности и точности. Лаплас был настолько впечатлен точностью, с которой он мог вычислить движение небесных тел, что он попытался представить возможности демона, обладающего всей информацией. Он решил, что с помощью вычислений его демон мог бы предсказать будущее или реконструировать прошлое:

> *«Если бы человеческий интеллект мог знать в данный момент все силы, которыми одушевлена природа, и взаимное положение составляющих ее существ и к тому же был бы достаточно силен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, если бы он мог охватить одной формулой все движения Вселенной — как величайших ее тел, так и легчайшего из атомов, ничто не осталось бы для него неизвестным, и будущее, как и прошлое, предстало бы его глазам».*

Лаплас, разумеется, имел в виду Вселенную, основанную на механике Ньютона. Насколько реалистично выглядит его демон сегодня? Может ли полное знание настоящего и безграничные математические способности свести прошлое и будущее к простому вычислению?

С пандемониумом Сетки демон Лапласа не справится.

Сначала давайте рассмотрим стоящую перед демоном проблему. Лаплас полагал, что если вы определите положение и скорость каждого атома в мире, то вы определите весь мир. Не останется больше ничего неизвестного. Кроме того, он думал, что физика

предоставляет уравнения, связывающие весь набор положений и скоростей в одно время с аналогичными параметрами в более поздние (или ранние) моменты времени. Таким образом, если бы вам было известно состояние мира в некоторый момент времени t_0, то вы могли бы вычислить состояние мира в любой другой момент времени t_1.

Благодаря современной квантовой теории мир стал гораздо больше, чем Лаплас мог себе представить. В нашей игрушечной модели использовалась лишь горстка кубитов*, но при этом она охватывала 32-мерный мир. Квантовая Сетка, которая воплощает в себе наше глубокое понимание реальности, предполагает *множество кубитов в каждой точке пространства и времени*. Кубиты в некоторой точке описывают различные вещи, которые могли бы в ней происходить. Например, один из них описывает вероятность того, что вы увидите (если посмотрите) электрон со спином вверх или вниз, другой — вероятность того, что вы увидите (если посмотрите) антиэлектрон со спином вверх или вниз, третий — вероятность того, что вы увидите (если посмотрите) красный кварк *и* со спином вверх или вниз... Другие кубиты описывают возможные результаты наблюдений, если вы посмотрите на фотоны, глюоны или другие частицы. Кроме того, если пространство и время непрерывны, что до сих пор очень успешно доказывалось существующими законами физики, то количество точек пространства-времени является бесконечным.

Мир больше не основан на подвешенных в пустоте атомах, поэтому его состояние больше не определяется положением и скоростью множества этих объектов. Вместо этого мир состоит из бесчисленного количества только что описанных кубитов. И чтобы описать его состояние, мы должны присвоить число — амплитуду вероятности — каждой возможной конфигурации кубитов.

---

* По одному для каждого пальца. — *Примеч. авт.*

В нашей игрушечной модели из пяти кубитов мы обнаружили, что все возможные состояния заполняют 32-мерное пространство. Пространство, которое мы должны использовать для описания состояния Сетки, то есть наш мир, предполагает бесконечность бесконечностей.

Гугол — это число, равное 10^{100} — единице со 100 нулями. Это невероятно большое число. Оно, например, намного превышает число атомов в видимой Вселенной. Однако даже если мы заменим все пространство решеткой всего лишь с десятью точками в каждом направлении и поместим в каждой точке всего по одному кубиту, *размерность* квантово-механической версии этой схематичной модели мира намного превысит число гугол. На самом деле размерность этого пространства превысит гугол гуголов.

Таким образом, первая часть стоящей перед демоном задачи, учитывая «взаимное положение составляющих мир существ», является очень сложной. Чтобы определить состояние мира, демон должен найти конкретную точку в ОЧЕНЬ, ОЧЕНЬ БОЛЬШОМ пространстве. По сравнению с этой задачей найти иголку в стоге сена проще простого.

Однако это еще не конец. Ранее мы уже говорили о случайном поведении Сетки. Она наполнена квантовыми флуктуациями или виртуальными частицами. Это грубое, неформальное описание реальности, для более точного выражения которой у нас теперь есть язык. Говоря, что в Сетке происходят спонтанные процессы, мы имеем в виду то, что ее состояние не является простым. Если мы с высоким разрешением посмотрим в пространство-время, чтобы выяснить, что происходит в сущности, которую мы называем пустым пространством, например, как это делали экспериментаторы на ускорителе БЭПК, мы обнаружим множество возможных результатов. Каждый раз, когда мы будем смотреть, мы будем видеть что-то другое. Каждое наблюдение раскрывает

часть волновой функции, которая описывает типичную, очень небольшую область пространства. Каждое наблюдение воплощает реализующуюся возможность, умноженную на значение некоторой амплитуды вероятности в пределах этой волновой функции.

Таким образом, мы ищем иголку, которая не находится ни в глубине стога, ни в каком-либо другом конкретном месте. Она находится в стороне, или, скорее, в этой стороне, и в той стороне, и в другой стороне и так далее в бесконечном количестве сторон.

Воображаемый демон Лапласа обладает совершенным знанием состояния мира. Он знает, где находится эта иголка. Но он воображаемый. Те из нас, кто не обладает совершенным знанием состояния мира, но все же хочет сделать какое-нибудь предсказание, сталкивается с некоторыми проблемами. Как мы можем приобрести некоторые из соответствующих знаний? Какое влияние окажут пробелы в наших знаниях? Как сказал Йоги Берра, по-видимому, научившись у Нильса Бора, «делать предсказания очень сложно, особенно относительно будущего». Существует (по крайней мере) две главные причины, почему так сложно предсказать будущее даже при наличии правильных уравнений.

Одной из них является теория хаоса. Грубо говоря, теория хаоса утверждает, что небольшие неопределенности в вашем знании о состоянии мира в момент времени t_0 ведут к очень большим неопределенностям в том, что вы можете выяснить о состоянии мира в значительно более поздний момент времени t_1.

Другой причиной является квантовая теория. Как мы уже говорили, квантовая теория, как правило, предсказывает вероятности, а не точные значения. На самом деле квантовая теория предоставляет совершенно определенные уравнения, описывающие изменения волновой функции системы во времени. Однако

при использовании волновой функции для предсказания будущих наблюдений она предоставит вам лишь набор вероятностей для различных результатов.

Все это привело к следующему: мы стали намного скромнее со времен Лапласа в отношении того, что мы в принципе можем вычислить. Однако на практике мы отвечаем на вопросы, которые Лаплас не мог себе представить, с помощью средств, о которых он не мог и мечтать. Например...

Большая числодробилка

Хорошо информированные, современные вычислительные демоны знают, что они не могут просто вычислить все, как демон Лапласа. Их искусство заключается в том, чтобы обнаруживать аспекты реальности, которые им поддаются. К счастью, случай, неопределенность и хаос не поражают все аспекты Природы. Многие вещи, в расчете которых мы больше всего заинтересованы, вроде формы молекулы, которую мы могли бы использовать в качестве лекарственного средства, прочности материала, из которого мы могли бы построить самолет, или массы протона, представляют собой устойчивые аспекты реальности. Кроме того, эти системы можно рассматривать изолированно; их свойства не сильно зависят от состояния мира в целом*. Для демонов-вычислителей стабильные изолированные системы являются естественными объектами, детальные портреты которых они могут создать.

Итак, полностью осведомленные о трудностях, но неустрашенные герои физики, собравшись с силами, подают заявки на гранты,

* По крайней мере, это хорошая рабочая гипотеза, и она успешно подтверждается. — *Примеч. авт.*

покупают кластеры компьютеров, паяют, программируют, отлаживают, даже думают — делают все, что нужно, чтобы вырвать у Сетки ответы.

Как мы вычисляем портрет протона?

Во-первых, мы должны заменить непрерывное пространство и время конечной структурой — решеткой из точек, которую способен обработать компьютер. Разумеется, это приближение, однако при достаточно малом расстоянии между точками ошибки также будут небольшими. Во-вторых, мы должны «втиснуть» ОЧЕНЬ, ОЧЕНЬ БОЛЬШУЮ квантовую реальность в классическую вычислительную машину. Квантово-механическое состояние Сетки существует в огромном пространстве, где его волновая функция охватывает множество возможных вариантов активности. Однако компьютер может манипулировать только несколькими вариантами одновременно. Поскольку уравнения для эволюции какого-либо из вариантов затрагивают все остальные варианты, классический компьютер должен хранить в памяти обширную библиотеку вариантов вместе с соответствующими амплитудами вероятности. Для развития текущего варианта компьютер шаг за шагом извлекает соответствующую информацию о старых вариантах. Для каждого сохраненного варианта он вычисляет изменения. Наконец, он сохраняет обновленную амплитуду вероятности для текущего варианта, приступает к развитию следующего и повторяет этот цикл снова и снова. Сетка — суровая дама.

Наши глаза не приспособлены для разрешения расстояний порядка 10^{-14} сантиметров, а наш мозг не воспринимает временные промежутки порядка 10^{-24} секунд. Эти возможности не помогли бы нам спастись от хищников или найти брачных партнеров. Однако в результате просчета конфигураций Сетки наши компьютеры создают узоры, которые мы бы увидели, если бы наши глаза были способны воспринимать крошечные отрезки расстояния и времени. С помощью этих узоров мы можем заострить

свое зрение. Именно это позволяет нам создать схему, изображенную на рис. 8.3.

После того как мы заставили «пустое» пространство «загудеть», мы можем его «пощипать». То есть обеспечить возмущение Сетки, добавив некоторую дополнительную активность, а затем позволить восстановиться покою. Если мы найдем стабильные, локализованные концентрации энергии, то это будет означать, что мы обнаружили — то есть вычислили — стабильные частицы. Мы можем сопоставить их (если эта теории правильна!) с протонами *p*, нейтронами *n* и т. д. Если мы находим локализованные концентрации энергии, которые сохраняются в течение довольно долгого времени, прежде чем рассеяться, это будет означать, что мы обнаружили нестабильные частицы. Они должны соответствовать ρ-мезонам (ро-мезонам), Δ-барионам (дельта-барионам) и их сородичам.

В этом состоит наше глубочайшее понимание того, что собой представляют *p*, *n*, ρ, Δ и другие частицы.

На рис. 9.1 показана конкретная задача, которая стоит перед нами. Это часть спектра адронов, то есть сильно взаимодействующих частиц, которые мы наблюдали. Они сопровождаются значениями двух ключевых определяющих свойств: массы и спина. Надпись содержит техническое описание изображенных объектов. Эти данные (а есть еще намного больше!) могут быть понятны специалистам, однако смысл в том, что существует множество интересных фактов, которые теории предстоит объяснить.

Далее, на рис. 9.2 показано, как три массы из измеренных используются для определения параметров теории. То есть до выполнения расчетов мы не знаем, какие массы мы должны присвоить кваркам или совокупной константе связи. Наиболее точным способом определения этих значений является сам расчет. Поэтому мы пробуем разные значения и останавливаемся на тех, которые лучше всего соответствуют наблюдениям.

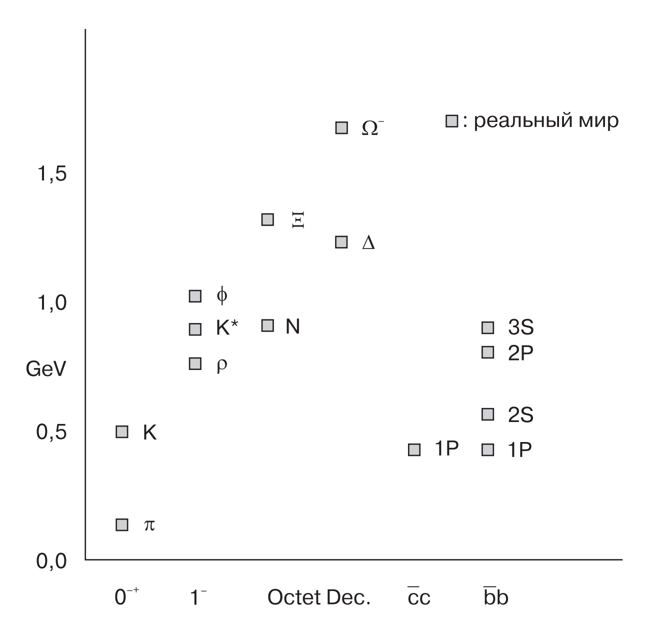


Рис. 9.1. Перечень сильно взаимодействующих частиц, которые должны учитываться КХД. Каждая точка соответствует наблюдаемой частице. Высота точки показывает массу частиц. Первые два столбца — это мезоны со спином 0: π, *K* и спином 1: ρ, K*, φ. Третий и четвертый столбцы — это барионы со спином 1/2: N, K; и спином 2/3: Δ, Ω соответственно. Пятый и шестой столбцы — это мезоны чармоний и боттомоний с различными спинами. Эти мезоны интерпретируются как связанные состояния тяжелого (очарованного) кварка *c* и его антикварка или соответственно (нижнего) кварка *b* и его антикварка. В этих столбцах высоты представляют собой массовые различия между частицей, о которой идет речь, и легчайшим состоянием чармония или боттомония

Если теория имеет много параметров, вы регулируете их значения так, чтобы вместить как можно больше данных, таким образом, ваша теория не прогнозирует эти значения, а просто приспосабливает их. Для описания подобной деятельности ученые используют такие термины, как «аппроксимация кривой» и «подгоночные параметры». Эти фразы не являются лестными. С дру-

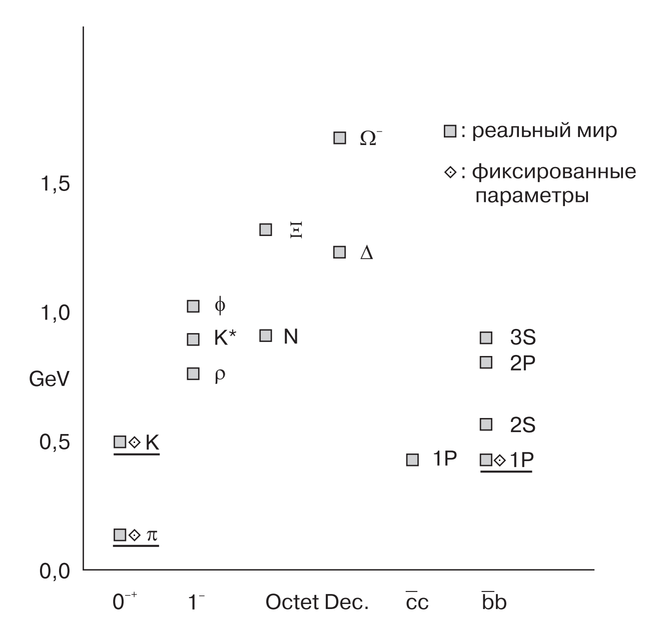


Рис. 9.2. Три массы используются для определения свободных параметров КХД. Таким образом, мы подгоняем, а не прогнозируем эти три массы. Однако после того, как мы это сделали, у нас больше нет места для маневра

гой стороны, если теория включает лишь несколько параметров, но применяется к большому количеству данных, то она является очень мощной. Вы можете использовать небольшое подмножество измерений для определения параметров; в этом случае все остальные измерения будут предсказаны.

В этом объективном смысле КХД является очень мощной теорией. Мало того, что она не требует большого количества параметров, она их *не допускает*: только масса для каждого вида кварков и одна универсальная константа связи. Кроме того, большинство масс кварков не имеют значения для вычисления массы представленных на рисунке частиц с доступной нам степенью

точности: другие эффекты вносят большую неопределенность. Нам нужна только средняя масса m_{light} самых легких кварков u и d, масса m_s странного кварка и константа связи. После фиксации этих трех параметров у нас больше не будет возможностей для маневра. Надстроечные параметры отсутствуют, никакие оправдания не помогут, спрятаться негде. Если теория верна, то расчет будет соответствовать реальности. Если расчет не соответствует реальности, теория неверна.

На рис. 9.3 показано, как расчетные значения массы и спина — недвусмысленные предсказания КХД — соотносятся с наблюдаемыми значениями. Поскольку спин является дискретной величиной, мы имеем либо точное соответствие, либо разногласие. Таким образом, лучше бы мы обнаружили частицы с точно предсказанными спинами и приблизительно предсказанными массами. Со вздохом облегчения отмечаем, что возле каждого «реального» квадрата есть либо «вычисленный» круг, либо «фиксированный параметр» — ромб. Вы видите, что расчетные массы достаточно хорошо согласуются с наблюдаемыми значениями. Вокруг расчетных значений вы заметите вертикальные отрезки, соответствующие величине погрешности. Они отражают остаточные неопределенности в расчетах. Пришлось пойти на некоторые компромиссы и приближения в связи с конечной — хотя и фантастически большой — вычислительной мощностью компьютера, которая была доступна.

Важным моментом на этом рисунке является точка с надписью *N*. *N* означает нуклон, то есть протон или нейтрон. (В масштабе данного рисунка их массы неразличимы.) КХД успешно определяет массы протонов и нейтронов, исходя из первых принципов. В свою очередь, масса в протонах и нейтронах составляет большую часть массы материи. Я обещал объяснить происхождение 95 % массы. Вот оно.

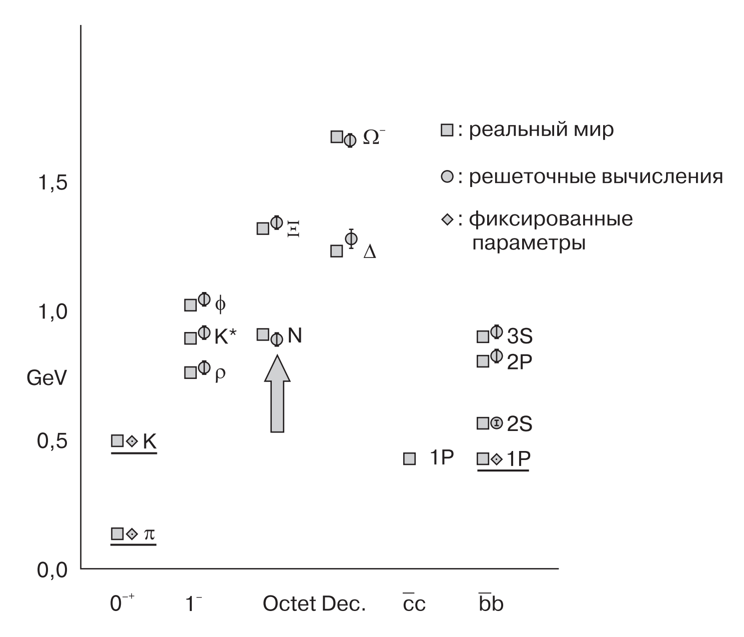


Рис. 9.3. Успешное сравнение наблюдаемых и предсказанных значений спина и массы частиц

Примечательным также является то, чего компьютер *не выдает*. Нет дополнительных кругов, соответствующих спрогнозированным частицам, которые в результате не были обнаружены. Особо следует подчеркнуть то, что, хотя основными входными данными для расчета являются кварки и глюоны, они не присутствуют среди выходных данных! Принцип конфайнмента, который казался таким странным и отчаянным, здесь играет роль примечания к полному и всеобъемлющему соответствию реальности.

Конечно, вычислять — или использовать для этого гигантский сверхбыстрый компьютер — не значит понимать. Понимание — это задача следующей главы.

Тем не менее, прежде чем закончить эту главу, я хотел бы остановиться на неброском рис. 9.3 и отдать должное группе его

авторов. С помощью сложных расчетов, требующих строжайшей точности и всей мощи современных компьютерных технологий, они показали, что непреклонные уравнения высокой симметрии убедительно и в количественном отношении точно объясняют существование протонов и нейтронов, а также их свойства. Они продемонстрировали происхождение массы протона и, таким образом, происхождение львиной доли *нашей* массы. Я считаю это одним из величайших научных достижений всех времен.

Глава 10. Происхождение массы

Умение что-то вычислить не равнозначно пониманию. Компьютерные вычисления происхождения массы могут быть убедительными, но этого мало. К счастью, мы можем понять происхождение массы.

Ответы, полученные в результате трудоемких и непрозрачных компьютерных вычислений, не удовлетворяют нашу жажду понимания. А что могло бы ее удовлетворить?

Поль Дирак славился своей молчаливостью, но то, что он говорил, часто обладало глубоким смыслом. Однажды он сказал: «Я чувствую, что понимаю уравнение, когда я могу предвидеть поведение его решений, не решая его».

В чем ценность такого понимания?

«Решение» уравнений — это лишь один из инструментов работы с ними, и не самый совершенный. Расчеты, которые мы обсуждали в предыдущей главе, являются поучительным примером. Они убедительно показывают, что уравнения для кварковой и глюонной Сетки точно учитывают массы протонов, нейтронов и других адронов. Они также показывают, что эти уравнения скрывают кварки и глюоны. (Вы можете использовать невозможность существования изолированных кварков или глюонов для вычисления

их массы, когда вы учитываете их облака виртуальных частиц — ответом является бесконечность!)

Те славные результаты были достигнуты благодаря героическим усилиям человека и машины. Однако потребность в героизме является одним из самых больших недостатков подхода, подразумевающего «решение» уравнений. Мы не хотим тратить дорогие ресурсы компьютера и долго ждать ответа каждый раз, когда задаем немного другой вопрос. Что еще важнее, мы не хотим тратить дорогие ресурсы компьютера и *очень* долго ждать ответа, когда мы задаем более сложные вопросы. Например, мы бы хотели иметь возможность предсказывать массы не только отдельных протонов и нейтронов, но и систем, содержащих несколько протонов и нейтронов — атомных ядер. В принципе, у нас есть для этого уравнения, но их решение является нецелесообразным. Мы имеем адекватные уравнения для ответа на любой вопрос химии. Однако от этого химики не лишились работы и не были заменены компьютерами, поскольку эти расчеты слишком сложны.

В случае как ядерной физики, так и химии мы готовы пожертвовать чрезвычайной точностью ради простоты использования и гибкости. Вместо того чтобы «решать» уравнения, перемалывая числа, мы создаем упрощенные модели и выводим эмпирические правила, которые могут предоставить нам практическое руководство в сложных ситуациях. Эти модели и эмпирические правила могут вырасти из опыта решения уравнений, и их можно проверить путем решения уравнений, когда это целесообразно, однако они живут своей собственной жизнью. Это напоминает мне о различии между аспирантами и профессорами: аспирант знает все ни о чем, а профессор ничего не знает обо всем. Решение уравнений — это удел аспирантов, понимание — удел профессоров.

Мы бываем бесконечно далеки от понимания, когда при решении уравнений обнаруживаем поведение, которое является совершенно неожиданным и похожим на чудо. Компьютеры дали

нам массу — и не просто массу, а *нашу* массу, массу составляющих нас протонов и нейтронов — из кварков и глюонов, которые сами по себе массы не имеют (или почти не имеют). В результате решения уравнений КХД получается масса без массы. Это звучит подозрительно, как нечто из ничего. Как это случилось?

К счастью, мы можем получить приблизительное *понимание* этого кажущегося чуда. Для этого нам требуется собрать вместе три идеи, которые мы уже обсуждали по отдельности. Давайте освежим их в памяти.

Первая идея: цветущие бури

Цветной заряд кварка обеспечивает возмущение Сетки — конкретно в глюонных полях, — которое растет с увеличением расстояния. Это похоже на странное облако, которое распускается из прозрачного центра, превращаясь в зловещую грозовую тучу. Возмущение полей означает их перевод в состояние более высокой энергии. Для возмущения полей в бесконечном объеме требуется бесконечная энергия. Думаю, даже Exxon Mobil не будет утверждать, что у Природы достаточно ресурсов, чтобы заплатить такую цену*. Таким образом, кварки не могут существовать в свободном состоянии.

Вторая идея: дорогостоящая компенсация

Цветущую бурю можно прекратить, поместив рядом с кварком антикварк с противоположным цветным зарядом. В этом случае два источника возмущения нейтрализуют друг друга и покой восстановится.

Если бы антикварк был расположен точно над кварком, компенсация была бы полной. При этом произошло бы минимально

---

* Возможно, это несколько наивно с моей стороны. — *Примеч. авт.*

возможное возмущение в глюонных полях, то есть никакого. Однако у такой точной компенсации есть еще одна цена, обусловленная квантово-механической природой кварков и антикварков.

Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, если вы хотите иметь точное знание о положении частицы, вам необходимо допустить широкий разброс в значении ее импульса. В частности, вы должны допустить, что частица может иметь *большой* импульс. Но большой импульс означает большую энергию. И чем более точно вы зафиксируете положение частицы (локализуете ее, выражаясь научными терминами), тем больше энергии вам придется на это потратить.

(Цветной заряд кварка также можно нейтрализовать, используя дополнительные цветные заряды двух других кварков. Это то, что происходит с барионами, в том числе с протоном и нейтроном, в отличие от мезонов, основанных на паре «кварк — антикварк». Принцип остается тем же.)

Третья идея: второй закон Эйнштейна

Итак, есть два конкурирующих эффекта, которые работают в противоположных направлениях. Чтобы точно погасить полевое возмущение и минимизировать затраты энергии, Природа хочет поместить антикварк над кварком. Однако, чтобы минимизировать квантово-механическую стоимость локализации положения, Природа позволяет антикварку немного «побродить».

Природа идет на компромиссы. Она находит возможность сбалансировать потребности глюонных полей, которые не хотят, чтобы их беспокоили, с потребностями кварков и антикварков, которые хотят свободно перемещаться. (Можно подумать о семье, где глюонные поля — это старые зануды, кварки и антикварки — раздражающие дети, а Природа — ответственный взрослый.)

Как и в случае любого компромисса, результатом является... компромисс. Природа не может одновременно сделать обе энергии равными нулю. Таким образом, суммарная энергия не будет равна нулю.

На самом деле, могут существовать различные компромиссы, которые являются более или менее стабильными. Каждый из них будет иметь свою собственную ненулевую энергию E. Таким образом, согласно второму закону Эйнштейна каждый будет иметь свою собственную массу, $m = E / c^2$.

Это и есть источник массы. (Или по крайней мере 95 % массы обычной материи.)

Схолия

Такая кульминация заслуживает комментария. На самом деле она заслуживает схолии, что на латыни означает «комментарий», но звучит более впечатляюще.

1. Ничто в настоящем отчете о возникновении массы не указывает на наличие массы у кварков и глюонов и не зависит от него. Мы действительно получаем массу без массы.
2. Это бы не сработало без квантовой механики. Вы *не можете* понять, откуда берется ваша масса, если не будете принимать во внимание квантовую механику. Другими словами, без квантовой механики вы обречены быть невесомыми.
3. Аналогичный механизм, хотя и гораздо более простой, работает в атомах. Отрицательно заряженные электроны испытывают притяжение к положительно заряженному ядру. Они хотели бы прижаться к этому ядру. Однако электроны представляют собой «волны-частицы», что их и сдерживает. Результат опять-таки представляет собой ряд возможных компромиссных решений. Это то, что мы наблюдаем как энергетические уровни атома.

4. Названием первой статьи Эйнштейна был вопрос и одновременно вызов:

   «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?»

   Если под телом подразумевается человеческое тело, масса которого неимоверно возрастает за счет содержащихся в нем протонов и нейтронов, ответ ясен и однозначен. Инерция этого тела с точностью 95 % *представляет собой* содержащуюся в нем энергию.

Глава 11. Музыка Сетки: поэма в двух уравнениях

Массы частиц соответствуют частотам, с которыми вибрирует пространство, когда на нем играют. Эта музыка Сетки превосходит старый оплот мистиков, «Музыку сфер», как в фантазии, так и в реальности.

Давайте объединим второй закон Эйнштейна:

$$m = E / c^2$$

с другим фундаментальным уравнением, формулой Планка — Эйнштейна — Шрёдингера:

$$E = h\nu.$$

Формула Планка — Эйнштейна — Шрёдингера связывает энергию E квантово-механического состояния с частотой ν, на которой вибрирует его волновая функция. В данной формуле h — это постоянная Планка. Планк представил ее в своей революционной гипотезе (1899), положившей начало квантовой теории. Согласно данной гипотезе атомы излучают или поглощают

свет частоты ν только дискретными порциями энергии $E = h\nu$. Эйнштейн пошел дальше, представив свою фотонную гипотезу (1905), согласно которой свет с частотой ν всегда организован в виде порций энергии $E = h\nu$. Наконец, Шрёдингер положил это соотношение в основу своего главного уравнения для волновых функций — уравнения Шрёдингера (1926). Это породило современную универсальную интерпретацию: волновая функция любого состояния с энергией E вибрирует с частотой ν, заданной соотношением $\nu = E / h$*.

Объединив уравнение Эйнштейна с уравнением Шрёдингера, мы получаем изумительное поэтическое выражение:

$$\nu = mc^2 / h \tag{11.1}$$

У древних народов существовала концепция под названием «Музыка сфер», которая вдохновляла многих ученых (в частности, Иоганна Кеплера) и еще большее количество мистиков. Поскольку периодическое движение (вибрация) музыкальных инструментов обусловливает их устойчивые тона, согласно этой идее периодические движения планет по своим орбитам должны сопровождаться своего рода музыкой. Несмотря на живописность, это вдохновляющее ожидание так и не стало достаточно точной или продуктивной научной идеей. Поскольку концепция «Музыки сфер» представляет собой не более чем смутную метафору, она всегда заключается в кавычки.

Наше уравнение (11.1) является более фантастичным и еще более реалистичным вариантом той же вдохновляющей идеи. Вместо того чтобы дергать струну, дуть в дудочку, бить по барабану или ударять в гонг, мы играем на инструменте, который представляет собой пустое пространство, сильно ударяя друг по другу различными комбинациями кварков, глюонов, электронов,

---

* Внимательные читатели узнают в этом соотношении второй закон Шрёдингера. — *Примеч. авт.*

фотонов... — то есть битами, которые представляют эти вещи, — и позволяя им достичь равновесия со спонтанными процессами в Сетке. Ни планеты, ни какие-либо материальные конструкции не ставят под угрозу чистую идеальность нашего инструмента. Он приходит в одно из своих возможных вибрационных движений с разными частотами ν в зависимости от того, как и чем мы производим удары. Эти колебания представляют собой частицы разной массы m согласно уравнению 11.1. Массы частиц играют Музыку Сетки.

Глава 12. Глубокая простота

Наши лучшие теории физического мира кажутся запутанными и сложными в силу их глубокой простоты.

Часто цитируемый совет Эйнштейна гласит: «Сделайте все так просто, как только возможно, но не проще». После изучения общей теории относительности Эйнштейна или его теории флуктуаций в статистической механике — двух наиболее сложных его творений — вы можете усомниться в том, что он следовал своему собственному совету.

Конечно, эти теории не являются простыми в обычном смысле этого слова.

Современные физики считают квантовую хромодинамику почти идеально простой теорией, однако мы уже видели, насколько сложно описать квантовую хромодинамику обывательским языком и насколько сложно работать с этой теорией (а *не* решать ее).

Подобно глубокой истине Бора, глубокая простота содержит элемент своей противоположности — глубокой сложности. Это парадокс, который на глубинном уровне разрешается довольно просто, как мы увидим далее.

Совершенство, поддерживающее сложность: Сальери, Иосиф II и Моцарт

Я узнал, что такое совершенство, благодаря печально известному посредственному композитору Антонио Сальери*. В одной из моих любимых сцен одного из моих любимых фильмов под названием «Амадей» Сальери в изумлении смотрит в рукописи Моцарта и говорит: «Переставишь одну ноту и получишь диссонанс. Переставишь одну фразу, и все рассыплется».

В этой фразе Сальери ухватил сущность совершенства. Два его предложения точно определяют то, что мы подразумеваем под совершенством во многих контекстах, в том числе в теоретической физике. Можно сказать, что это определение идеально.

Теорию можно назвать идеальной, если любое изменение приводит к ее ухудшению. Это первое предложение Сальери, переведенное с языка музыки на язык физики. И оно попадает прямо в точку. Однако настоящая гениальность проявляется во втором предложении Сальери. Теория становится совершенно идеальной, если нельзя значительно ее изменить, не разрушив ее полностью; то есть если в результате значительного изменения теория теряет смысл.

В том же фильме император Иосиф II дает Моцарту такой музыкальный совет: «Ваша работа гениальна. Это очень качественное произведение. В нем просто слишком много нот, только и всего. Уберите несколько, и оно будет совершенным». Император был смущен внешней сложностью музыки Моцарта. Он не осознавал, что каждая нота служила определенной цели —

---

* По поводу посредственности Сальери серьезные музыкальные критики все еще спорят. Тем не менее он печально известен именно своей посредственностью. — *Примеч. авт.*

давала или выполняла обещание; завершала рисунок или разнообразила его.

Аналогичным образом при первом знакомстве с фундаментальной физикой многих людей отпугивает ее видимая сложность. Слишком много глюонов!

Однако каждый из восьми цветных глюонов служит определенной цели. Вместе они обеспечивают полную симметрию между цветными зарядами. Уберите один глюон или измените его свойства каким-либо образом, и структура рухнет. В частности, если вы внесете подобное изменение, то теория, ранее известная как КХД, начнет выдавать бессмысленные предсказания: некоторые частицы будут производиться с отрицательными вероятностями, а другие — с вероятностью, превышающей единицу. Такая абсолютно жесткая теория, не допускающая последовательных модификаций, является крайне уязвимой. Если какое-либо из ее предсказаний окажется ошибочным, то спрятаться будет негде. Нет никаких подгоночных параметров. С другой стороны, совершенно жесткая теория, если она оказывается достаточно успешной, становится поистине мощной. Поскольку если она предположительно правильна и не может быть изменена, то она наверняка совершенно правильна!

Критерии Сальери объясняют, почему симметрия является таким привлекательным принципом при построении теории. Системы, обладающие симметрией, имеют все шансы на то, чтобы считаться совершенными, согласно идее Сальери. Уравнения, регулирующие различные объекты и различные ситуации, должны быть строго связаны между собой, в противном случае симметрия уменьшится. При определенном количестве нарушений вся модель разрушается и симметрия пропадает. Симметрия помогает нам создавать совершенные теории.

Таким образом, суть вопроса заключается не в количестве нот, частиц или уравнений, а в совершенстве воплощенной в них

структуры. Если удаление любой из составляющих может привести к разрушению этой структуры, то их количество ровно таково, каково и должно быть. Ответ Моцарта императору был превосходным: «Какие именно несколько нот вы имеете в виду, Ваше Величество?»

Глубокая простота: Шерлок Холмс, снова Ньютон и молодой Максвелл

Один из вернейших способов избежать совершенства заключается в добавлении ненужных сложностей. Ненужные сложности можно переместить без ухудшения структуры и удалить без ее разрушения. Кроме того, они отвлекают внимание, как в следующей истории про Шерлока Холмса и доктора Ватсона.

> *Шерлок Холмс и доктор Ватсон отправились в поход. Установив палатку под звездным небом, они легли спать. Посреди ночи Холмс разбудил Ватсона и спросил его: «Ватсон, посмотрите на звезды! Что они говорят нам?»*
>
> *«Они учат нас смирению. На небе, должно быть, миллионы звезд, и если даже у небольшой их части есть такие планеты, как Земля, то существуют сотни планет, населенных разумными существами. Некоторые из них могут оказаться мудрее нас. Вероятно, они смотрят через свои огромные телескопы на Землю, какой она была много тысяч лет назад. Возможно, они задаются вопросом, разовьется ли когда-нибудь на ней разумная жизнь».*
>
> *А Холмс сказал: «Ватсон, эти звезды говорят нам о том, что кто-то украл нашу палатку».*

Возвращаясь от смешного к возвышенному, вы можете припомнить, что сэр Исаак Ньютон не был доволен своей теорией гравитации, которая подразумевала действие сил через пустое

пространство. Однако, поскольку эта теория согласовывалась со всеми существующими наблюдениями и он не мог внести какие-то конкретные улучшения, Ньютон отложил свои философские оговорки и представил ее без прикрас. В заключительной «Главной схолии» к своим «Началам» он сделал классическое заявление*:

> *«Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою. Гипотезам же метафизическим, физическим и механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии».*

Ключевая фраза «Гипотез же я не измышляю» в оригинале на латыни звучит так: Hypothesis non fingo. Эта фраза является легендой, которую Эрнст Мах положил в основу портрета Ньютона в своей влиятельной работе «Механика». Эта фраза достаточно известна, чтобы ей была посвящена отдельная статья в «Википедии». Она просто означает, что Ньютон отказался перегружать свою теорию гравитации спекуляциями, не подтверждаемыми наблюдениями. (Тем не менее личные бумаги Ньютона показывают, что он с одержимостью работал над поиском доказательств существования заполняющей пространство среды.)

Разумеется, самый простой способ избежать ненужных сложностей заключается в том, чтобы вообще ничего не говорить. Чтобы не попасть в эту ловушку, обратимся к молодому Максвеллу. Согласно его раннему биографу, будучи маленьким мальчиком, он часто спрашивал с гэльским акцентом: «Что там происходит?» И, получив неудовлетворительный ответ, снова задавал вопрос: «Но что *конкретно* там происходит?»

---

* Предупреждение: вы можете испытать чувство дежавю. Я уже приводил эту цитату в главе 7. — *Примеч. авт.*

Другими словами, мы должны быть амбициозны. Мы должны продолжать задавать новые вопросы и стремиться к конкретным ответам, выраженным в количественном виде.

> *Фраза «научная революция» использовалась для обозначения столь многих вещей, что потеряла свою ценность. Возникновение амбиций, связанных с созданием точных математических моделей мира, и вера в успех этих начинаний — вот настоящая бесконечная научная революция.*

Существует творческое трение между конфликтующими требованиями экономии на предположениях и предоставления *конкретных* ответов на множество вопросов. *Глубокая* простота скупа на входы, но щедра на выходы.

Сжатие, распаковка и (не)разрешимость

Сжатие данных является центральной проблемой в сфере коммуникационных и информационных технологий. Я думаю, что это позволяет нам по-новому взглянуть на значение и важность простоты в науке.

При передаче информации мы хотим извлечь максимум из доступной пропускной способности. Таким образом, мы сокращаем сообщение, удаляя из него избыточную или несущественную информацию. Такие аббревиатуры, как MP3 и JPEG, знакомы пользователям плееров и цифровых камер; MP3 — это формат сжатия аудио, а JPEG — формат сжатия изображений. Разумеется, приемник на другом конце должен принять сжатые данные и распаковать их, чтобы воспроизвести первоначальное сообщение. Подобные проблемы возникают и при хранении информации. Нам нужно, чтобы данные хранились в компактном виде, но были доступны для распаковки.

В более широкой перспективе многие из проблем, с которыми сталкиваются люди при осмыслении мира, являются проблемами

сжатия данных. Информация о внешнем мире переполняет наши органы чувств. Нам необходимо вместить их в доступную пропускную способность нашего мозга. Мы испытываем слишком много, чтобы сохранять об этом в памяти точную информацию, так называемая фотографическая память является редкой и в лучшем случае ограниченной. Мы создаем рабочие модели и эмпирические правила, которые позволяют нам использовать небольшие представления о мире, достаточно адекватные, чтобы мы могли в нем функционировать. Фраза «Приближается тигр!» сжимает гигабайты оптической информации, а также мегабайты аудио с ревом тигра, а может быть, даже несколько сигналящих об опасности килобайт запаха и ветра, вызываемого его движением, в крошечное сообщение. (Для экспертов: 23 байта в кодировке ASCII.) Большой объем информации был отброшен, однако из того, что есть, мы можем извлечь некоторые очень полезные данные.

Построение *очень* простых теорий в области физики — это Олимпийские игры* в сфере сжатия данных. Цель состоит в нахождении кратчайшего сообщения, в идеале выраженного одним уравнением, которое при распаковке создает подробную и точную модель физического мира. Как и все Олимпийские игры, эта подразумевает свои правила. Вот два наиболее важных:

- за неопределенность снимаются баллы;
- теории, которые дают неправильные предсказания, подлежат дисквалификации.

Как только вы поймете природу этой игры, некоторые из ее странных особенностей начнут казаться менее загадочными.

В частности, для оптимального сжатия данных мы должны использовать сложные и трудные для чтения коды. Рассмотрим,

---

* Это, конечно, не входит в Олимпийские игры, поэтому не является Олимпийским событием. Однако как задача, достойная греческих богов и богинь, она может считаться Олимпийской. — *Примеч. авт.*

к примеру, фразу: «Скажите это предложение на русском». Удалив гласные, мы ее укоротим: «Скжт т прдлжн н рсскм».

Это предложение читается труднее, однако в нем нет никакой двусмысленности. Согласно правилам игры, это шаг в нужном направлении. Давайте пойдем еще дальше, устранив пробелы: «Скжттпрдлжннрсскм».

Теперь это предложение вызывает больше сомнений. Его можно спутать с фразой: «Скажет топор должен на росе соком».

Конечно, русский язык является настолько богатым, что подобный способ кодировки теряет много баллов из-за неопределенности. Трудно решить, какое именно предложение можно считать допустимым. Имея дело с глубокой простотой, мы должны производить распаковку данных, используя конкретные математические процедуры. Однако, как показывает этот простой пример, мы должны ожидать того, что короткие коды будут менее прозрачными по сравнению с исходным сообщением и что их декодирование потребует сообразительности и тщательной работы.

После столетий развития самые короткие коды могут стать весьма непонятными. Чтобы научиться их использовать, могут потребоваться годы, а для прочтения любого конкретного сообщения — тяжелая работа. Теперь вы понимаете, почему современная физика выглядит так, как она выглядит!

На самом деле все может быть намного хуже. Общая проблема нахождения оптимального способа сжатия произвольного набора данных, как известно, неразрешима. Эта причина тесно связана со знаменитой теоремой Геделя о неполноте и (особенно) с демонстрацией Тьюринга, показавшего, что проблема определения того, отправит ли программа компьютер в бесконечный цикл, является неразрешимой. На самом деле в процессе поиска оптимального способа сжатия данных вы сталкиваетесь с проблемой Тьюринга: вы не можете быть уверены в том, что ваш последний замечательный трюк для создания коротких кодов не отправит декодер в бесконечный цикл.

Однако набор данных Природы далеко не кажется произвольным. Нам удалось создать очень короткие коды, которые полно и точно описывают большие фрагменты реальности. Более того, в прошлом, по мере того как наши коды становились все более короткими и абстрактными, мы обнаруживали, что распаковка новых кодов дает новые сообщения, которые, как оказывается, соответствуют новым аспектам реальности.

Когда Ньютон зашифровал три закона движения планет Кеплера в своем законе всемирного тяготения, обнаружились объяснения приливов и отливов, предварения равноденствий и многих других явлений. В 1846 году, после того как почти два столетия гравитация Ньютона шла от триумфа к триумфу, небольшие расхождения обнаружились в орбите Урана. Урбен Леверье обнаружил, что мог объяснить эти расхождения, предположив существование новой планеты. Когда наблюдатели направили свои телескопы туда, куда он указал, они обнаружили Нептун! (Сегодняшняя проблема темной материи является впечатляющим отголоском этого, как мы увидим далее).

Все более сжатые *очень* простые исходные уравнения, все более сложные вычисления для их расшифровки, все более богатые результаты, которым мир, как оказывается, соответствует. По-моему, это является приземленной интерпретацией того, что Эйнштейн имел в виду, говоря: «Господь изощрен, но не злонамерен». В стремлении к дальнейшему объединению мы ставим на то, что удача не отвернется от нас.

Часть II

СЛАБОСТЬ ГРАВИТАЦИИ

В астрономии гравитация является наиболее важной силой. Однако на фундаментальном уровне, в масштабах элементарных частиц гравитационные силы ***смехотворно*** *малы по сравнению с электрическим или сильным взаимодействием. Это несоответствие бросает вызов идеалу единой теории, которая стремится привести все силы к одному основанию. Наше новое понимание происхождения массы подсказывает решение этой проблемы.*

Глава 13. Сила гравитации мала? Да на практике

При сравнении оказывается, что действующая между элементарными частицами гравитация чрезвычайно слабее других фундаментальных сил.

Если вы только что с трудом поднялись с постели или с радостью рухнули в кресло с хорошей книгой после долгого трудового дня, то вам может быть сложно согласиться с утверждением о слабости гравитации. Тем не менее на фундаментальном уровне это так. Гравитация смехотворно слаба.

Приведем некоторые сравнения.

Атомы удерживаются вместе благодаря электрическим силам. Между положительно заряженным ядром атома и отрицательно заряженными электронами существует электрическое притяжение. Давайте представим, что мы могли бы отключить действие электрических сил. Осталось бы гравитационное притяжение. Насколько близко друг от друга находились бы ядро и электроны, удерживаемые гравитацией? Какого размера был бы атом, связанный гравитацией? Размером с блоху? Нет. С мышь? Нет. С небоскреб? Нет, продолжайте. С Землю? И близко нет. Атом, удерживаемый

гравитацией, имел бы радиус, *в 100 раз превышающий радиус видимой Вселенной*.

Знаменитым гравитационным эффектом является отклонение светового луча Солнцем. Его наблюдение британской экспедицией в 1919 году стало триумфом общей теории относительности и принесло Эйнштейну мировую славу. Целое Солнце, действуя на движущийся мимо него фотон, отклоняет его путь на 1,75 угловой секунды, что составляет около 0,05 % от 1°. Теперь сравните это с эффектом, оказываемым на глюоны сильным взаимодействием. Несколько кварков отклоняют прямолинейный путь глюона так сильно, что этот глюон полностью поворачивается в пределах радиуса протона и остается внутри него.

Мы также можем сравнить численные значения. Поскольку с увеличением расстояния электрические и гравитационные силы уменьшаются одинаково (обратно пропорционально квадрату расстояния), мы получим одинаковое соотношение на любом расстоянии. Сравним электрическую силу и гравитацию между протоном и электроном. Электрическая сила будет сильнее гравитации примерно в 10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 раз. Говоря научным языком, это 10^{40}. (Вы видите, почему ученые предпочитают научный язык). «Чепуха! — восклицает критик. — Протоны являются сложными объектами. Вы должны сравнивать силы, действующие между базовыми объектами». Хорошо, умник, однако в этом случае дело обстоит еще хуже! Если мы сравним силы, действующие между электронами, то получим еще большее число — около 10^{43}, поскольку масса электрона меньше массы протона, однако величина его электрического заряда является той же самой.

Когда вы поднимаетесь с постели, вы преодолеваете гравитационное притяжение всей Земли, используя небольшую часть химической энергии, оставшейся от вчерашнего ужина. Любой, кто пытался сжечь калории, сражаясь с гравитацией (поднятие тяже-

стей, гимнастика), может подтвердить, что сила тяжести не особо сопротивляется — нескольких калорий хватает надолго.

Вот еще один пример, позволяющий оценить слабость гравитации. Электромагнитное излучение – один из столпов современной астрономии. С ним работают и радиотелескопы, и оптические телескопы, и рентгеновские спутники. Электромагнитное излучение столь же не заменимо в современных телекоммуникациях: от обычной радиосвязи до спутниковых тарелок и оптоволокна. Гравитационное излучение, напротив, до сих пор не обнаружено*, несмотря на титанические усилия.

Сила тяжести является доминирующей силой в астрономии, но только по умолчанию. Другие виды взаимодействия намного сильнее, однако они подразумевают как притяжение, так и отталкивание. Обычно материя достигает точного равновесия, при котором силы компенсируют друг друга. Временный (небольшой) дисбаланс между электрическими силами приводит к грозам; временный небольшой дисбаланс в сильном взаимодействии вызывает ядерные взрывы. Значительные нарушения равновесия не могут иметь места. Однако гравитация всегда притягивает. Несмотря на слабость на уровне отдельных базовых частиц, гравитационные силы неумолимо нарастают. Смиренные наследуют космос.

* Обнаружено в 2015 году (https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102). — *Примеч. пер.*

Глава 14. Сила гравитации мала? Нет в теории

Гравитация является универсальной силой, существование которой связано с базовой структурой пространства и времени. Ее следует рассматривать в качестве фундаментальной. Таким образом, мы должны использовать гравитацию как меру других вещей, но не использовать другие вещи как меру гравитации. Следовательно, гравитация не может быть слабой в абсолютном смысле — она является просто тем, чем является. Тот факт, что гравитация *кажется* слабой, заводит теорию в тупик. Это также главное препятствие на пути к построению единой теории взаимодействий.

Теория гравитации Эйнштейна, общая теория относительности, связывает существование гравитации со структурой пространства и времени. Согласно этой теории, эффект, который мы наблюдаем как действие силы тяжести, — это просто тела, пытающиеся двигаться по прямой линии по искривленному ландшафту пространства-времени. Тела также искривляют пространство-время. Искривление, вызванное телом B, влияет на

движение тела А, создавая то, что на языке Ньютона мы назвали бы «силой тяжести»*.

Далеко идущим последствием Эйнштейновского представления о гравитации является *универсальность* этой силы. Любое тело, делающее все возможное, чтобы двигаться по прямой линии, путешествуя сквозь искривленное пространство-время, будет следовать тем же путем, что и любое другое тело. Наилучший путь определяется кривизной пространства-времени, а не каким-либо особым свойством этого тела.

На самом деле наблюдаемая универсальность силы тяжести представляла собой большую часть того, что привело Эйнштейна к его теории. В ньютоновском описании гравитации эта универсальность являлась необъяснимым совпадением (или, скорее, бесконечным количеством случайностей, по одной для каждого тела). С одной стороны, сила тяготения, действующая на тело, пропорциональна его массе. С другой стороны, ускорение, испытываемое телом в результате действия данной силы, обратно пропорционально массе. (Это второй второй** закон движения Ньютона. Оригинальный второй закон движения формулируется так: $F = ma$; а этот — так: $a = F / m$.) Объединив обе эти идеи, мы обнаруживаем, что гравитационное ускорение тела — фактическое возмущение его движения, совершенно не зависит от его массы!

И это именно то, что мы наблюдаем: движение не зависит от массы. Наблюдаемое поведение является *универсальным*: под действием силы тяжести все тела ускоряются одинаково. Однако

---

* Если точнее, то теория Ньютона описывает результаты общей теории относительности приблизительно. Теория Ньютона работает лучше всего, когда тела движутся медленно по сравнению со скоростью света и не являются слишком большими и плотными. — *Примеч. авт.*

** Здесь, как и много где еще, продолжаются отсылки к шутке про три закона Ома. — *Примеч. науч. ред.*

в описании Ньютона для этого нет никаких причин. Это еще одна из тех вещей, которые работают на практике, но не в теории. Сила тяжести, действующая на тело, не обязана быть пропорциональной его массе. Нам, конечно же, известны силы, которые не пропорциональны массе, например электрические силы.

В теории Эйнштейна гравитационное «совпадение» объяснено. Вернее, оно преодолено: мы не должны отдельно говорить о силе и реакции на нее, которые зависят от массы противоположным образом. У нас просто есть тела, делающие все возможное, чтобы двигаться прямо сквозь искривленное пространство-время. Это глубокая простота в лучшем выражении.

Универсальность и объединение. Когда мы приступаем к поиску единой теории, включающей все силы природы, сочетание универсальности гравитации и ее (кажущейся) слабости представляет большую сложность. Далее перечислены возможные альтернативы.

- Сила тяжести может быть получена из других фундаментальных сил. Поскольку она оказывает небольшой (слабый) эффект, вероятно, сила тяжести является побочным продуктом, небольшим остатком после практически полного уравновешивания эффектов противоположных электрических или цветных зарядов или чего-то еще более экзотического. В таком случае почему она должна быть универсальной? Остальные силы точно *не являются* универсальными: кварки, а не электроны участвуют в сильном взаимодействии; электроны и кварки, но не фотоны или цветные глюоны подвергаются влиянию электромагнитных сил. Трудно себе представить простую универсальную силу, которая оказывала бы одинаковое влияние на все частицы, состоящие из таких однобоких компонентов.
- Другие силы могут быть получены из силы тяжести. Легко представить себе, как неуниверсальные силы могут возникать из одной универсальной. Для универсальных уравнений с энер-

гией, сконцентрированной в небольших областях пространства, могут существовать несколько различных решений; мы могли бы интерпретировать эти решения как частицы с различными свойствами. (По-видимому, сам Эйнштейн надеялся создать теорию материи, основываясь на этих соображениях.) Однако трудно себе представить, как невероятно слабая сила может породить гораздо более мощные.

- Все силы могут казаться имеющими одну основу, как различные аспекты единого целого (возможно, связанные симметрией), подобно разным сторонам игральной кости. Но опять же эту идею трудно примирить с тем фактом, что гравитация намного слабее по сравнению с другими силами.

С другой стороны, вера в возможность объединения сил приводит нас в состояние отрицания. Мы не можем признать, что гравитация на самом деле слаба, хотя нам и кажется, что это так. Видимость, или, вернее, наша интерпретация, должно быть, вводит нас в заблуждение.

Глава 15. Правильный вопрос

Теоретически гравитация не должна быть слабой. Но на практике так и есть. Суть этого парадокса состоит в том, что сила тяжести, безусловно, *кажется* слабой *нам*. Что с нами не так?

Мы измеряем силу тяжести по ее влиянию на материю. Наблюдаемая нами сила гравитации пропорциональна массе тел, которые мы используем, чтобы ее наблюдать. Масса этих тел практически полностью складывается из масс протонов и нейтронов, из которых они состоят.

Итак, если гравитация кажется слабой, как мы уже видели, мы можем винить либо саму гравитацию за малодушие, либо протоны (и нейтроны) — за легковесность.

Высокая теория предполагает, что мы должны рассматривать силу тяжести в качестве фундаментальной. С этой точки зрения сила тяжести является только тем, чем является, — она не может быть объяснена с точки зрения ничего более простого. Таким образом, если мы хотим примирить теорию с практикой, мы должны ответить на вопрос:

«Почему протоны такие легкие?»

Постановка правильного вопроса часто является решающим шагом на пути к достижению понимания. Хорошие вопросы — это вопросы, на которые мы можем найти ответ. Поскольку мы достигли глубокого понимания происхождения массы протона, мы готовы ответить на вопрос, почему протоны такие легкие.

Глава 16. Красивый ответ

Почему протоны такие легкие? Поскольку мы понимаем, откуда берется масса протона, мы можем дать красивый ответ на этот вопрос. Этот ответ устраняет главный барьер на пути к единой теории взаимодействий и призывает нас отправиться на поиски такой теории.

Давайте кратко повторим, как протон получил свою массу, стараясь в процессе этого найти то, что обусловливает малую величину этой массы. (Это резюмирует часть главы 10.)

Масса протона возникает как компромисс между двумя конфликтующими эффектами. Цветной заряд, переносимый кварками, возмущает глюонное поле вокруг них. Данное возмущение мало вначале, но возрастает по мере удаления от кварка. Эти возмущения в глюонном поле связаны с затратами энергии. Стабильными будут состояния с наименьшей возможной энергией, поэтому «дорогостоящие» возмущения придется отменить. Возмущение, вызываемое цветным зарядом кварка, может обнулить находящийся поблизости антикварк с противоположным зарядом или — как это происходит в протонах — два дополнительных кварка с до-

полнительными цветными зарядами. Если бы аннулирующие кварки располагались непосредственно поверх исходного кварка, то не осталось бы никакого возмущения. Это, конечно же, привело бы к (нулевому) возмущению с наименьшей возможной (нулевой) энергией.

Тем не менее квантовая механика предполагает разнообразные энергетические затраты, вынуждающие идти на компромисс. Квантовая механика утверждает, что кварк (или любая другая частица) не имеет определенного положения. Он обладает диапазоном возможных положений, описанным его волновой функцией. Иногда мы говорим не о частицах, а о волнах-частицах, чтобы подчеркнуть этот фундаментальный аспект квантовой теории. Чтобы привести волну-кварк в состояние с малым разбросом положений, мы должны позволить ему иметь большую энергию. Короче говоря, для локализации кварка требуется энергия. Полное ее обнуление, которое мы рассматривали в предыдущем абзаце, потребовало бы того, чтобы обнуляющие кварки имели точно такое же положение, что и исходные кварки. Это не сработает, поскольку энергетическая стоимость локализации является непомерно высокой.

Таким образом, необходим компромисс. В компромиссном решении будет присутствовать некоторая энергия, оставшаяся в результате неполной компенсации возмущения в глюонных полях, а также некоторая энергия, оставшаяся после не совсем полной локализации кварков. Из общего значения E этих энергий возникает масса протона согласно второму закону Эйнштейна $m = E / c^2$.

В этом описании новейшим и самым сложным элементом является возрастание возмущения в глюонном поле по мере увеличения расстояния. Оно тесно связано с асимптотической

свободой, открытие которой недавно принесло троим счастливчикам Нобелевскую премию. Асимптотическая свобода представляет собой небольшой эффект обратной связи от виртуальных частиц, как я уже говорил ранее. Его можно рассматривать как форму «поляризации вакуума», с помощью которой сущность, называемая нами пустым пространством, то есть Сетка, антиэкранирует навязанный заряд. Сетка наносит ответный удар, Сбежавшая Сетка, Сумасшедшая Сетка — все это могло бы лечь в основу фильма ужасов для мыслящего человека.

Однако реальность покорилась. Антиэкранировка нарастает постепенно, особенно вначале. Если исходный (цветной) заряд мал, его влияние на Сетку сначала невелико. Сама Сетка в процессе антиэкранирования наращивает эффективный заряд, так что каждый последующий этап наращивания происходит все быстрее. В конце концов возмущение становится значительным и угрожающим, поэтому должно быть подавлено. Однако это может занять некоторое время, то есть прежде, чем это произойдет, вы можете достаточно сильно удалиться от исходного кварка.

Если возмущение нарастает медленно, то проблема локализации аннулирующих кварков не стоит слишком остро. Нам не обязательно добиваться очень точной локализации. Таким образом, затраты энергии, связанные с возмущением и локализацией, невелики, следовательно, мала и масса протона.

Именно поэтому протоны являются настолько легкими!

Только что приведенное мной объяснение *на самом деле ничего не объясняет*. Вы не могли меня видеть, но пока я печатал предыдущие абзацы, я размахивал руками, проявляя свою итальянскую натуру. Фейнман был известен подобными туманными аргументами. Однажды он объяснил свою теорию сверхтекучего гелия Паули, используя такие аргументы. Паули, жесткий кри-

тик, не был им убежден. Фейнман настаивал на своем, а Паули не поддавался, пока Фейнман с раздражением не спросил: «Ты же не считаешь, что все сказанное мной неправильно?» На что Паули ответил: «Я считаю, что все, что ты сказал, не является даже неправильным».

Чтобы наше объяснение могло быть неправильным, мы должны сформулировать его гораздо более конкретно. Когда мы говорим, что протоны являются легкими, что мы подразумеваем под словом «легкий»? Каковы численные значения? Можем ли мы объяснить *смехотворную* слабость гравитации, которая, как вы помните, имеет фантастически малую величину?

Видение Пифагора, единицы измерения Планка

Предположим, у вас есть друг в галактике Андромеды, с которым вы можете связаться только с помощью текстовых сообщений. Как вы передадите ему основные данные о себе — ваш рост, вес и возраст? У вашего друга нет доступа к земным линейкам, весам или часам, поэтому вы не можете просто сказать: «Мой рост равен стольким-то сантиметрам, мой вес составляет столько-то килограммов, и мне столько-то лет». Вам нужны универсальные единицы измерения.

В 1899 и 1900 годах Макс Планк принимал активное участие в исследованиях, которые положили начало квантовой теории. Эти исследования достигли своей кульминации в декабре 1900 года, когда Планк ввел свою знаменитую постоянную h, которая применяется в используемых нами сегодня фундаментальных уравнениях квантовой механики. Незадолго до этого он выступил с обращением к Прусской Королевской академии наук в Берлине, в котором, по сути, поставил вышеописанный вопрос.

(Хотя он и не сформулировал его в терминах обмена текстовыми сообщениями.) Он назвал его вызовом, связанным с определением *абсолютных величин*. В проводимом исследовании Планка интересовало не то, что он мог раскрыть секреты атома, свергнуть классическую логику или пошатнуть основы физики. Все это произошло гораздо позже и с участием других людей. Планка интересовал способ решения проблемы абсолютных величин.

Проблема абсолютных величин может казаться академической, однако она также была близка сердцу философов, мистиков и философски настроенных ученых-мистиков. Манифест постклассической физики XX (и XXI) века был выпущен задолго до Планка, примерно в 600 году до н. э., когда Пифагор Самосский поделился удивительным видением. Изучая звуки, издаваемые струнными щипковыми инструментами, Пифагор обнаружил, что человеческое восприятие гармонии связано с числовыми соотношениями. Он исследовал струны, изготовленные из одного и того же материала, имеющие одинаковую толщину и натяжение, но разную длину. В этих условиях он обнаружил, что звуки воспринимаются как гармоничные именно тогда, когда соотношение длин струн может быть выражено небольшими целыми числами. Например, соотношение длин 2:1 соответствует октаве, 3:2 — квинте, а 4:3 — кварте. Видение Пифагора выражается максимой «все вещи суть числа».

Оглядываясь так далеко в прошлое, трудно быть уверенными в том, что именно имел в виду Пифагор. Вероятно, отчасти его видение представляло собой форму атомизма, основанную на идее о возможности создания форм из чисел. Сегодняшняя терминология квадратов и кубов чисел происходит от этой идеи о создании форм. Наше построение «все из бита» более чем подтверждает идею о том, что «некоторые важные вещи суть

числа». В любом случае понимаемое в буквальном смысле изречение Пифагора, безусловно, заходит слишком далеко. Абстрактные числа, например 3, не имеют длины, массы или продолжительности во времени. Сами по себе числа не могут служить физическими единицами измерения — из них нельзя создать линейки, весы или часы.

Планковская проблема абсолютных величин сосредоточена именно на этом вопросе. В наш цифровой век мы привыкли к идее о том, что информация, как она представляется в текстовых сообщениях, может быть закодирована с помощью последовательности чисел (нулей и единиц). Таким образом, Планк, по сути, спрашивал, являются ли числа достаточными если не для построения, то по крайней мере для описания всех физически значимых аспектов материального тела, другими словами, «всего», что о нем можно сказать? То есть можем ли мы передать меры длины, массы и времени, используя только числа?

Планк отметил, что, хотя андромедиане не имеют доступа к нашим линейкам, весам или часам, у них есть доступ к нашим физическим законам, которые соответствуют законам, действующим у них. В частности, они могли бы измерить три универсальные константы:

- *c* — скорость света;
- *G* — гравитационную постоянную Ньютона. В теории Ньютона она представляет собой меру силы гравитации. В законе тяготения Ньютона сила тяготения между телами с массами m_1, m_2, разделенными расстоянием *r*, равна Gm_1m_2 / r^2;
- *h* — постоянную Планка.

(На самом деле Планк использовал величину, несколько отличную от современной константы *h*, которую он на тот момент еще не вывел.)

Из этих трех величин путем деления и возведения в степень можно получить единицы длины, массы и времени. Их называют планковскими единицами. Вот они.

L_p — планковская длина. Алгебраически выражается так: $\sqrt{\frac{hG}{c^3}}$. В численном выражении это $1{,}6 \times 10^{-33}$ сантиметра.

M_p — планковская масса. Алгебраически выражается так: $\sqrt{\frac{hc}{G}}$. В численном выражении это $2{,}2 \times 10^{-5}$ граммов.

T_p — планковское время. Алгебраически выражается так: $\sqrt{\frac{hG}{c^5}}$. В численном выражении это $5{,}4 \times 10^{-44}$ секунды.

Очевидно, величины Планка не очень удобны для повседневного использования. Длина и время смехотворно малы даже для субатомной физики. Длина Планка, например, составляет 1/100 000 000 000 000 000 000 (10^{-20}) размера протона. Масса Планка, равная 22 микрограммам, является не столь непрактичной. Дозировка витаминов, например, часто измеряется в микрограммах. Таким образом, вы можете пойти в магазин здорового питания и поискать там таблетки с планковской массой витамина B_{12}. Тем не менее для фундаментальной физики масса Планка является смехотворно большой: она примерно соответствует массе 10 000 000 000 000 000 000 (10^{19}) протонов.

Несмотря на непрактичность этих единиц измерения, Планк гордился тем, что они основаны на величинах, которые присутствуют (предположительно) в универсальных физических законах. По его словам, эти единицы являются абсолютными. Вы можете использовать их для решения проблемы передачи в текстовом сообщении своих жизненно важных данных своему другу из галактики Андромеды. Вы просто выражаете свою длину, массу и продолжительность во времени (то есть возраст) в виде — больших! — множителей соответствующих планковских единиц.

На протяжении XX века, по мере развития физики, построения Планка приобретали все большую важность. Физики пришли к по-

ниманию того, что каждая из величин *c*, *G*, *h* играет роль коэффициента преобразования, необходимого для реализации глубокой физической концепции.

- Специальная теория относительности постулирует операции симметрии (преобразования Лоренца), которые смешивают пространство и время. Однако пространство и время измеряются с помощью различных единиц, поэтому для того, чтобы эта концепция имела смысл, необходим коэффициент преобразования, на роль которого подходит *c*. Умножая время на *c*, мы получаем длину.
- Квантовая теория постулирует обратное отношение между длиной волны и импульсом, а также между частотой и энергией как аспектами волнового дуализма; однако эти пары величин измеряются с помощью различных единиц, и в качестве коэффициента преобразования необходимо ввести *h*.
- Общая теория относительности постулирует, что кривизна пространства-времени индуцируется плотностью энергии-импульса, однако кривизна и плотность энергии измеряются с помощью различных единиц, и в качестве коэффициента преобразования необходимо ввести *G*.

В рамках этого круга идей величины *c*, *h*, *G* обретают величественный статус. Они помогают реализации глубоких физических принципов, которые без них не имели бы смысла.

Протокол объединения

С помощью планковских единиц мы можем оценить, насколько хорошо наше понимание происхождения массы протонов учитывает слабость гравитации и устраняет ли оно барьер на пути к объединению сил, который, как казалось, был обусловлен слабостью гравитации.

Если мы хотим прийти к единой теории, главными компонентами которой являются специальная теория относительности, квантовая механика и общая теория относительности, то мы должны обнаружить, что самые базовые, лежащие в основе всего законы физики выглядят естественно, будучи выраженными в планковских единицах. Мы не должны получить ни слишком больших, ни слишком малых величин.

Суть нашей проблемы, связанной с очевидной слабостью гравитации, заключается в том, что масса протона очень мала, будучи выраженной *в планковских единицах*. Однако мы пришли к пониманию того, что масса протона не является прямым отражением самых основных законов физики. Она возникает из компромисса между энергией глюонного поля и энергией локализации кварка. *Базовой* физикой, лежащей в основе массы протона, тем, что запускает этот процесс, является затравочная постоянная взаимодействия (или затравочный заряд). Ее величина определяет, насколько быстро нарастание энергии глюонного поля становится угрожающим и, таким образом, сколько энергии потребуется на квантовую локализацию обнуляющих кварков, наконец, значение массы протона согласно второму закону Эйнштейна.

Возможно ли, что умеренный затравочный заряд обусловливает очень малое значение массы протона, выраженной в единицах Планка? Чтобы ответить на этот вопрос, мы, конечно же, должны определить, что мы подразумеваем под *умеренным* значением затравочного заряда. Чтобы измерить силу базового затравочного заряда, давайте определим, каковы его базовые физические эффекты. Можно рассмотреть любой из следующих эффектов: порождаемая им сила, потенциальная энергия или (для экспертов) поперечное сечение рассеяния этого заряда. Если измерять все эти свойства на планковских расстояниях в планковских единицах, то все ответы будут схожими, какими бы мерами мы ни поль-

зовались. Итак, давайте возьмем силу, поскольку ее эффекты наиболее наглядны и знакомы. По словам Планка, затравочный заряд является умеренным, если он вызывает такое взаимодействие между кварками, разделенными расстоянием, соответствующим планковской длине, что оно не является ни крайне малым, ни крайне большим, будучи выраженным в планковских единицах. Конечно, он бы так и сказал. Дело не в авторитете Планка, а в идеале, воплощаемом его единицами измерения: в идеале, который заключается в возможности объединения специальной теории относительности, квантовой механики и гравитации (общей теории относительности) с другими взаимодействиями. Посмотрим на это под другим углом и спросим, приводит ли *принятие* этого идеала к последовательному пониманию того, почему протоны такие легкие и, следовательно, почему гравитация на практике настолько слаба.

Наконец, все сводится к очень конкретному численному вопросу: близка ли к единице величина взаимодействия между кварками, расположенными на расстоянии порядка длины Планка, будучи выраженной в планковских единицах измерения?

Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны экстраполировать известные нам законы физики на расстояния гораздо меньшие, чем те, на которых эти законы были проверены экспериментально. Длина Планка очень мала. Многое может пойти не так. Тем не менее в духе нашего иезуитского кредо, которое гасит: «Блаженнее просить прощения, чем разрешения», давайте просто сделаем это.

Необходимый расчет на самом деле довольно прост по меркам современной теоретической физики. Мы уже обсудили все необходимые идеи на словах. К сожалению, мне придется опустить всю алгебру, я милосердный человек, к тому же мой издатель настоятельно рекомендовал мне это сделать. Поэтому я просто сформулирую результат.

Мы находим, что затравочная постоянная сильного взаимодействия между кварками в планковском масштабе, выраженная в единицах Планка, составляет около 1/25. Это довольно осязаемое улучшение по сравнению с имевшимся у нас ранее расхождением 1/10 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000!

Таким образом, мы объяснили (очевидную) слабость гравитации, начиная с фундаментальной, новой, но имеющей под собой твердую основу физики. И мы преодолели главное препятствие на пути к единой теории взаимодействий.

Дальнейшие шаги

Я надеюсь, вы согласитесь, что это довольно интересная и связная история. Заявления «миссия выполнена» основывались и на гораздо меньшем.

Однако для великих выводов такая база кажется недостаточной. Это все равно что строить перевернутую пирамиду, балансирующую на одной вершине. Для ее укрепления нам нужно более широкое основание.

Нет более убедительного способа продемонстрировать то, что вы взяли барьер, чем завершение забега. Перед нами открывается путь к объединению сил. Вступим же на него.

Часть III

ЯВЛЯЕТСЯ ЛИ КРАСОТА ИСТИНОЙ?

Мы нашли логичное и красивое объяснение слабости гравитации. Но истинно ли оно? Чтобы установить его истинность и плодотворность или их отсутствие, нам необходимо встроить его в более широкий круг идей и вывести следствия, которые можно проверить.

Природа, кажется, намекает на возможность создания единой теории фундаментальных взаимодействий. Наше объяснение слабости гравитации очень хорошо вписывается в эти рамки. Однако для того, чтобы полностью и в деталях подтвердить это объединение, мы должны постулировать существование нового мира частиц. Некоторые из них должны материализоваться в ускорителе БАК (Большой адронный коллайдер), расположенном недалеко от Женевы. Другие могут пронизывать Вселенную, учитывая наличие в ней темной материи.

Глава 17. Объединение: песнь сирены

Известные частицы и виды взаимодействий составляют разрозненную структуру. Расширенная теория, основанная на тех же принципах, но отличающаяся большей симметрией, упорядочивает ее.

Мы видели, что некоторые хорошо известные физические законы приводят нас к глубокому объяснению одной из классических проблем физики, связанных со слабостью гравитации.

К сожалению, чтобы прийти к данному ответу, мы должны были распространить эти хорошо известные законы на гораздо меньшие расстояния по сравнению с теми, которые мы можем непосредственно исследовать. Точно так же* мы должны были распространить эти законы на уровни энергии, значительно превышающие те, что доступны для непосредственного исследования, — на энергии в «миллионы миллиардов» (10^{15}) раз превышающие те, на которые рассчитан многомиллиардный европейский ускоритель БАК. Таким образом, наше объяснение основано на фундаменте из непроверенных фактов!

---

* Мы обсуждали тесную связь между сверхкороткими расстояниями и сверхвысокими энергиями. Вы можете обратиться к примечаниям и некоторым дополнительным комментариям. — *Примеч. авт.*

Мы не должны пассивно принимать эту ситуацию. Мы можем поискать другие способы получения доступа к физике объединения, а также к физике сверхкоротких расстояний и сверхвысоких энергий. Прямой путь заблокирован. На практике мы не можем ускорять и сталкивать частицы на требуемом уровне энергий. Тем не менее мы можем поискать дополнительные признаки объединения — необъяснимые закономерности в доступных нам фактах.

Такие закономерности существуют. Пожалуйста, посмотрите на рис. 17.1 и 17.2.

$$\begin{pmatrix} u_r & u_w & u_ь \\ d_r & d_w & d_ь \end{pmatrix}^L_{1/6}$$

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}^L_{-1/2}$$

$$\left(u_r \; u_w \; u_ь \right)^R_{2/3}$$

$$\left(d_r \; d_w \; d_ь \right)^R_{-1/3}$$

$$\left(e \right)^R_{-1}$$

$$\nu^R$$

SU(3) × SU(2) × U(1)

Смешанные, необъединенные

Рис. 17.1. Организация частиц и взаимодействий в Центральной теории. Обращает на себя внимание то, что кварки и лептоны делятся на шесть отдельных групп, а взаимодействия — на три отдельные части

На рис. 17.1 представлена обнаруживаемая нами организация частиц — так называемая стандартная модель (включающая КХД). «Стандартная модель» — гротескно скромное название для одного из величайших достижений человечества. Стандартная модель в удивительно компактной форме обобщает почти все, что мы знаем о фундаментальных законах физики*. Все явления ядерной физики, химии, материаловедения и электронной техники

* Исключений я коснусь чуть позже. — *Примеч. авт.*

заключены в стандартной модели. И в отличие от шутливого выражения Фейнмана $U = 0$ и словесной гимнастики классической философии этот рисунок содержит конкретные алгоритмы для развертывания символов в модель физического мира. Это позволяет делать удивительные предсказания и с уверенностью разрабатывать, например, необычные лазеры, ядерные реакторы или сверхбыструю и сверхкомпактную компьютерную память. Не прибегая к гротескной скромности, в дальнейшем я буду ссылаться на стандартную модель как на Центральную теорию.

	R	W	B	G	P
u	+	–	–	+	–
u	–	+	–	+	–
u	–	–	+	+	–
d	+	–	–	–	+
d	–	+	–	–	+
d	–	–	+	–	+
u^c	–	+	+	–	–
u^c	+	–	+	–	–
u^c	+	+	–	–	–
d^c	–	+	–	+	+
d^c	+	–	–	+	+
d^c	+	+	–	+	+
ν	+	+	+	+	–
e	+	+	–	–	+
e^c	–	–	+	+	+
N	–	–	–	–	–

Гиперзаряд Y = –1/6 (**R** + **W** + **B**) + 1/4 (**G** + **P**)

Рис. 17.2. Организация тех же частиц и взаимодействий плюс много чего еще в единой теории. Обращает на себя внимание то, что кварки и лептоны объединены в одно целое, как и взаимодействия

Трудно было бы переоценить обширность области применения, мощность и доказанную точность Центральной теории. Поэтому я даже не буду пытаться это сделать. Данная теория

близка к последнему слову Природы. Она на длительное время, возможно навсегда, обеспечила основу для нашего фундаментального описания физического мира.

На рис. 17.2 представлена организация тех же частиц и их свойства в единой теории. Центральная теория далеко не автоматически может быть встроена в (гипотетическую) единую теорию. Если бы однобокие формы, присутствующие в Центральной теории, или связанные с ними странные числовые значения были другими, ничего бы не вышло. Вы не смогли бы объединить их (по крайней мере так аккуратно). Другими словами, при попытке объединения мы объясняем эти однобокие формы и странные числовые значения.

Природа поет обольстительную песню. Давайте прислушаемся к ней...

Центральная теория: биты выбора

В предыдущих главах мы довольно подробно обсудили сильное взаимодействие и описывающую его теорию — квантовую хромодинамику, или КХД. Современная квантовая теория электричества и магнетизма — квантовая электродинамика, или КЭД, — является одновременно матерью и младшей сестрой КХД. Матерью, потому что КЭД возникла раньше и предоставила множество концепций, которые легли в основу КХД; а сестрой, потому что уравнения квантовой электродинамики являются более простым, менее устрашающим вариантом уравнений КХД. КЭД мы также довольно подробно обсудили.

В рамках обычного хода вещей главная роль сильного взаимодействия заключается в построении протонов и нейтронов из кварков и глюонов. При этом практически нейтрализуются цветные заряды, однако оставшиеся дисбалансы порождают остаточные силы, которые связывают протоны и нейтроны в атомные ядра. Электромагнитное взаимодействие связывает электроны с ядра-

ми, создавая атомы. При этом практически нейтрализуются электрические заряды, однако оставшиеся дисбалансы порождают остаточные силы, которые связывают атомы в молекулы, а молекулы — в вещество. КЭД также описывает свет и все родственные ему формы электромагнитного излучения — радио, СВЧ, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение.

Третьим крупным игроком в Центральной теории является слабое взаимодействие. Его роль в природе менее заметна, но также крайне важна. Слабое взаимодействие отвечает за алхимию. Точнее, оно превращает кварки различных ароматов друг в друга, а также превращает друг в друга различные виды лептонов. На рис. 17.1 слабое взаимодействие производит преобразования в вертикальном направлении. (Сильное взаимодействие производит преобразования в горизонтальном направлении.) При изменении одного из *u*-кварков в протоне на *d*-кварк протон превращается в нейтрон. Таким образом, изменения, вызванные слабым взаимодействием, преобразуют атомное ядро одного элемента в атомное ядро другого. Реакции, основанные на «алхимии» слабого взаимодействия (более «важным» названием которой является «ядерная химия»), могут сопровождаться высвобождением гораздо большей энергии, чем у обычных химических реакций. Звезды живут на энергии, получаемой в результате систематического преобразования протонов в нейтроны.

Прежде чем углубляться в детали устройства ядра Центральной теории (сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий), я сделаю несколько замечаний о том, что (на время!) придется обойти вниманием, — о гравитации и массе нейтрино.

- Как мы уже обсуждали, кажущаяся слабость гравитации, вероятно, больше связана с нашим восприятием, чем с собственно гравитацией. И, как мы увидим в следующих нескольких главах, Природа побуждает нас включать гравитацию вместе с другими видами взаимодействий в качестве равноправного партнера, участвующего в объединении.

На практике нет никаких трудностей для включения гравитационных взаимодействий в Центральную теорию. Для этого существует уникальный и простой способ, и он работает. (Для экспертов: примените действие Эйнштейна — Гильберта к метрическому полю, минимизируйте взаимодействие материальных полей и сделайте квантование в плоском пространстве.) В своей повседневной работе астрофизики постоянно используют общую теорию относительности наряду с остальными компонентами Центральной теории, и вполне успешно. Это касается и тех, кто использует GPS.

Короче говоря, обычная практика отделения гравитации от других составляющих Центральной теории является удобной, но, вероятно, поверхностной.

- То, что нейтрино обладает ненулевой массой, было установлено в 1998 году, однако намеки на это появились еще в 1960-е годы. Значения масс нейтрино очень малы. Масса самого тяжелого из трех типов нейтрино не превышает одной миллионной массы следующей легчайшей из известных нам частиц — электрона. Нейтрино известны своей неуловимостью и призрачностью. Около 50 триллионов этих частиц ежесекундно проходят сквозь тело каждого из нас, но мы этого не замечаем. Джон Апдайк написал о нейтрино стихотворение, которое начинается такими словами:

  Нейтрино, крохотные тени,
  Отринув массу и заряд,
  Не признают закон общений,
  Взаимодействий и преград.
  Они по всей Вселенной шарят,
  Не поступаясь прямизной.
  Для них — пустой надутый шарик
  *Триллььоннотонный шар земной**.

* Перевод Г. Варденги.

Благодаря героическим усилиям экспериментаторы смогли довольно подробно изучить свойства нейтрино*.

Центральная теория прекрасно уживается с идеей о нулевой массе нейтрино, которая очень естественно встраивается в ее структуру. Для учета ненулевых масс нейтрино мы должны добавить новые частицы с необычными свойствами, для которых нет никакой другой мотивации или доказательств. Когда мы расширим Центральную теорию, чтобы получить единую теорию взаимодействий, все будет выглядеть совсем иначе. Тогда мы признаем новые частицы в качестве родственников — блудных детей, вернувшихся в семью. А их необычное поведение намекнет на их приключения в далеких краях.

Есть еще две сложности, которые я собираюсь приукрасить. Они представляют собой отклонения от моего главного сообщения, но не упомянуть о них было бы неправильно. Пожалуйста, не позволяйте этим поверхностным осложнениям отпугнуть вас. Признавая их существование, мы не позволим им исказить наше видение.

- Одной из сложностей являются массы и смешение калибровочных бозонов. В базовых уравнениях присутствует три симметричные группы калибровочных полей. Есть восемь цветных глюонных полей, с которыми вы уже познакомились. Еще три связаны с симметрией слабого взаимодействия. Они называются W^+, W^- и W^0, и все они симметричны друг другу. Наконец, есть один изолированный калибровочный бозон B^0 с «гиперзарядом». Сверхпроводимость Сетки придает ненулевые массы частицам, созданным W^+ и W^-, а также вполне определенной

* Написано несколько книг, посвященных нейтрино и их свойствам. (На самом деле они участвуют во взаимодействии, только очень редко.) Поскольку этот предмет является сугубо техническим и несколько уводящим от нашей основной темы, я описал его очень избирательно и кратко. Дополнительные подробности и ссылки вы можете найти в примечаниях. — *Примеч. авт.*

смеси W^0 и B^0. Возмущения в этой смеси производят массивные частицы, называемые Z-бозонами. Возмущения в другой комбинации W^0 и B^0 (для экспертов: ортогональная комбинация) остаются безмассовыми. Эта безмассовая комбинация W^0 и B^0 представляет собой фотон.

Подведем итог: с точки зрения математики симметрии поля W^0 и B^0 являются наиболее естественными. Однако возмущения с определенной массой, когда принимается во внимание сверхпроводимость Сетки, подразумевают смешение W^0 и B^0. Одним из типов возмущения является Z^0-бозон с ненулевой массой; другим типом будет фотон с массой, равной нулю.

Иногда говорят, что Центральная теория объединяет электромагнетизм и слабое взаимодействие. Это вводит в заблуждение. По-прежнему существует два различных вида взаимодействия, связанных с различными видами симметрии. В Центральной теории они смешиваются, а не объединяются.

- Другую сложность представляют массы и смеси кварков и лептонов. Существует три различных «семейства». Таким образом, кроме самого легкого семейства, включающего u- и d-кварки, электрон e и электронное нейтрино ν_e, существует два более тяжелых. Ко второму семейству относятся очарованный и странный кварки c и s, мюон μ и мюонное нейтрино ν_μ. Наконец, третье семейство содержит истинный и прелестный кварки t и b, тау-лептон τ и тау-нейтрино ν_τ.

  Как и калибровочные бозоны, все эти частицы не имели бы массы, если бы не сверхпроводимость Сетки. Сверхпроводимость Сетки придает им массу*, позволяет более тяжелым смешиваться и, таким образом, сложными способами распадаться на более легкие. Эти массы и смеси чрезвычайно интересуют экспертов,

* Нейтрино — это особый случай, как мы только что говорили. — *Примеч. авт.*

и понимание их значений является нерешенной задачей теоретической физики. Кроме того, непонятым остается более простой вопрос: почему существует именно три семейства?

Поскольку у меня нет каких-либо соображений по этому поводу, я не буду тратить время на отстаивание тех или иных подробностей. Это бы только отвлекло нас от хороших идей, которые мне хочется обсудить. Поэтому я постараюсь по возможности обойтись без лишних сложностей. Роман Толстого «Анна Каренина» начинается словами «Все счастливые семьи счастливы одинаково». В таком случае мы остановимся только на одном семействе.

Ух! Сложное это дело — докапываться до простоты. Однако после того, как мы на время отправили на чердак два странных подарка (гравитацию и массу нейтрино), избавились от путаницы, обусловленной сверхпроводимостью Сетки, и решили, что одного семейства будет достаточно, возникает четкий и лаконичный образ. Именно он представлен на рис. 17.1. Это самая суть Центральной теории.

Существует три симметрии: $SU(3)$, $SU(2)$ и $U(1)$. Они соответствуют сильному, слабому и электромагнитному взаимодействию*.

$SU(3)$ — это симметрия между тремя видами цветного заряда, как нам уже известно. Она сопровождается восемью калибровочными бозонами, которые изменяются или реагируют на цветные заряды, и действует в горизонтальном направлении на рис. 17.1.

$SU(2)$ — это симметрия между двумя дополнительными видами цветных зарядов. Она действует в вертикальном направлении на рис. 17.1.

---

* Строго говоря, электромагнетизм представляет собой смесь частей $SU(2)$ и $U(1)$, как мы только что говорили. Таким образом, симметрия $U(1)$ — это не совсем электромагнетизм. Она имеет собственное название — гиперзаряд. Однако я в основном буду использовать для нее более знакомое, но совсем точное название. — *Примеч. авт.*

Вы заметите, что каждая из частиц слева указана дважды. Каждая частица присутствует один раз в группе с индексом L и один раз — в группе с индексом R. Эти индексы относятся к *«рукости»*, или *хиральности*, данных частиц: L — для левой руки, R — для правой руки. «Рукость» частицы определяется, как показано на рис. 17.3. «Леворукие» и «праворукие» частицы взаимодействуют по-разному. Этот факт называется «нарушением четности». Впервые его осознали Цзундао Ли и Чжэньнин Янг в 1956 году, и это открытие принесло им Нобелевскую премию в минимально короткие сроки — в 1957 году.



Рис. 17.3. «Рукость», или хиральность, частицы определяется направлением ее спина относительно направления ее движения. «Леворукая» частица вращается в направлении загнутых пальцев, когда большой палец левой руки указывает в направлении ее движения

Симметрия $U(1)$ имеет дело только с одним видом заряда. Мы указываем его воздействие на различные частицы в соответствии с тем, насколько сильно и с каким знаком один ее бозон, по сути фотон, связывается с каждой из них. Маленькие цифры, расположенные рядом с каждой группой частиц, соответствуют именно этим показателям. Например, «праворукому» электрону соответствует значение -1, поскольку его электрический заряд равен -1

(в системе единиц измерения, в которой заряд протона равен +1). Самая крупная группа, состоящая из шести элементов, содержит *u*- и *d*-кварки с каждым из трех цветных зарядов. Электрический заряд *u*-кварков равен 2/3, в то время как *d*-кварки имеют электрический заряд, равный –1/3, поэтому средний электрический заряд внутри группы равен 1/6; именно это значение вы и видите.

Вот и все. Как я уже говорил, было трудно переоценить мощь и обширность сферы применения Центральной теории. На первый взгляд правила могут показаться несколько сложными, однако эти сложности ничто по сравнению, например, с правилами спряжения нескольких неправильных глаголов в латинском или французском языке. И в отличие от последних сложности Центральной теории не являются беспричинными. Они навязываются нам экспериментальными реалиями.

Критика

Партитура песни Природы, как мы ее слышим, представлена на рис. 17.1. Мы записали эту песню и сумели зафиксировать ее в чрезвычайно компактной форме. Она представляет собой великое достижение, подводящее итоги столетиям блестящей работы.

Тем не менее, если судить по самым высоким эстетическим стандартам, возможностей для улучшения очень много. Глядя на эту партитуру, Сальери вряд ли бы воскликнул: «Переставишь одну ноту и получишь диссонанс». Скорее он бы сказал: «Интересный набросок, но он нуждается в доработке».

Возможно, зная, что он смотрит на работу мастера, Сальери бы воскликнул: «Природа, видимо, доверила свое произведение ловкому подражателю!»

Во-первых, существует три не связанных между собой взаимодействия. Они основаны на одних и тех же принципах симметрии и реакции на заряды, однако эти заряды делятся на три различные

группы, которые не могут быть преобразованы друг в друга. Есть преобразования (с участием цветных глюонов КХД), которые преобразуют красные, белые и синие цветные заряды друг в друга, а также преобразования (с участием *W*- и *Z*-бозонов), которые превращают друг в друга зеленый и фиолетовый цветные заряды. А электрический заряд — это вообще отдельная вещь.

Хуже того, различные кварки и лептоны делятся на шесть не связанных между собой кластеров. И эти кластеры не очень впечатляют — один содержит шесть элементов, а остальные, содержащие три, три, два, один и один элемент, лишь отдаленно напоминают мотивы песни. Наиболее диссонирующими являются те странные числа, средние электрические заряды, связанные с каждым кластером. Они кажутся случайными.

Кредитный счет

К счастью, Центральная теория содержит затравку собственного превосходства. Ее главным принципом является симметрия, а симметрия — это концепция, которую мы можем развивать чистой мыслью, просто используя свои головы. Мы можем играть с уравнениями.

Например, мы способны представить, что существуют преобразования, которые превращают сильные цветные заряды в слабые и наоборот. Это будет создавать более крупные кластеры связанных между собой частиц, и, возможно, между ними обнаружатся интересные закономерности. В лучшем случае мы могли бы надеяться на то, что три различных преобразования симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ представляют собой разные грани одной большой мастер-симметрии, которая включает в себя их все.

Математический аппарат симметрии разработан очень хорошо, поэтому у нас есть мощные инструменты для решения задач, связанных с выявлением подобных закономерностей. Существует

не так много возможностей, так что мы можем систематически перепробовать их.

Мастер-симметрия, которая кажется мне наиболее убедительной, основывается на группе преобразований, известной как $SO(10)$. Все интересные возможности представляют собой незначительные вариации этой.

Математически группа $SO(10)$ состоит из вращений в десятимерном пространстве. Я хотел бы подчеркнуть, что это «пространство» является чисто математическим. Это не то пространство, в котором вы могли бы передвигаться, даже будучи очень маленьким существом. Скорее, десятимерное пространство группы $SO(10)$, мастер-симметрии, которая включает симметрии $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ Центральной теории, то есть объединяет сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия, является домом для концепций. В этом пространстве каждый из цветных зарядов Центральной теории (красный, белый, синий, зеленый и фиолетовый) представлен отдельной двумерной плоскостью (поэтому существует всего $5 \times 2 = 10$ измерений). Поскольку есть вращения, которые преобразуют любую плоскость в любую другую, группа $SO(10)$ объединяет и расширяет заряды и симметрии Центральной теории.

Людей, искушенных в математике, не удивит то, что симметрии можно комбинировать для получения более крупных симметрий. Как я уже говорил, для этого у нас есть хорошо разработанные инструменты. Гораздо менее автоматическим и оттого гораздо более впечатляющим является то, что рассеянные кластеры кварков и лептонов сочетаются между собой. Именно это изображено на рис. 17.2. Это то, что я люблю называть кредитным счетом*.

В этом кредитном счете все кварки и лептоны находятся на равных. Любой из них может быть преобразован в любой другой. Они образуют очень специфическую структуру, так называемое

---

* Здесь игра слов Charge Account от charge — «заряд». — *Примеч. пер.*

спинорное представление $SO(10)$. Когда мы производим отдельные вращения в двумерных плоскостях, соответствующие красному, белому, синему, зеленому и фиолетовому зарядам, мы в каждом случае обнаруживаем, что половина частиц имеет положительный, а другая половина — отрицательный заряд. Они отмечаются символами «+» и «–» в кредитном счете. Каждая возможная комбинация «+» и «–» возникает только один раз, это ограничение связано с тем, что общее количество «+»-зарядов является четным.

Электрические заряды, которые в рамках Центральной теории выступают в качестве случайных украшений, суть важные элементы в гармонии объединения. Они больше не являются независимыми относительно других зарядов. Формула:

$$Y = -\frac{1}{3}(R + W + B) + \frac{1}{2}(G + P)$$

выражает электрический заряд, точнее, гиперзаряд через другие заряды. Поэтому преобразования, связанные с вращением электрического заряда, поворачивают каждую из первых трех плоскостей на некоторый общий угол, а последние две — на угол в 3/2 раза больший в противоположном направлении.

Для достижения этой степени унификации мы должны осознать, что «праворукие» частицы можно рассматривать в качестве античастиц их собственных («леворуких») античастиц. Например, «праворукий» электрон является античастицей «леворукого» позитрона. Любое из описаний имеет один и тот же физический смысл, поскольку и частица, и ее античастица представляют собой возбуждения одного и того же поля, и именно это поле присутствует в первичных уравнениях. Преобразования симметрии между полями устанавливают связь между возбуждениями одной и той же хиральности, поэтому для нахождения всех возможных симметрий мы будем иметь дело только с «леворукими» возбуждениями (даже если это означает, что нам придется работать с античастицами).

При переходе от кредитного счета к Центральной теории очень важно понимать, что дополнительные цветные заряды нейтрализуются. Равные количества красного, белого и синего заряда или равные количества зеленого и фиолетового заряда обнуляют друг друга. Так, например, три равных количества (+) красного, белого и синего цветного заряда «леворукого» электрона e обнуляются. Поэтому они также обнуляются и в «праворуком» электроне, представленном в кредитном счете в виде его «леворукой» античастицы e^c. Любые электроны являются невидимыми для цветных глюонов КХД. Другими словами, электроны не участвуют в сильном взаимодействии.

Наиболее странной является последняя запись кредитного счета — *N*. Ее сильные и слабые цветные заряды обнуляются. Таким образом, она невидима как для сильных, так и для слабых взаимодействий. Ее электрический заряд также равен нулю. Поэтому данная частица не реагирует на обычные силы Центральной теории. Из-за этого ее чрезвычайно сложно обнаружить — сложнее, чем нейтрино, которые участвуют по крайней мере в слабом взаимодействии. (*N* испытывает и оказывает гравитационное воздействие, но на практике, как мы уже обсуждали, гравитация отдельных частиц смехотворно слаба).

Разумеется, *N* не наблюдалось. Как это могло произойти? Если мы наблюдаем нечто, то это не может быть *N*, которое по определению ненаблюдаемо! Конечно, этот «триумф» теории является ложным. Однако *N* приветствуется и по более позитивной причине. Это дополнительная частица, которая, будучи добавленной в Центральную теорию, позволяет нейтрино иметь его крошечную массу*.

В левом столбце кредитного счета указаны названия частиц (кварки и лептоны), которые мы используем для построения Центральной теории и мира. Однако мы могли бы удалить этот

* Подробнее об этом далее, в главе 21. — *Примеч. авт.*

столбец. Если бы мы не знали названий этих частиц или их свойств, но имели бы только кредитный счет без всяких надписей, мы ничего бы не потеряли. Мы могли бы реконструировать свойства всех частиц, основываясь на информации кредитного счета (и конечно, их названия служат только для удобства).

И наоборот, если бы кластеры Центральной теории имели несколько другие формы или если бы сопровождающие их странные числа были другими, структура разрушилась бы.

Кредитный счет отображает соответствие математического идеала физической реальности. Это вполне достойно самой высокой похвалы Сальери: «Переставишь одну ноту и получишь диссонанс. Переставишь одну фразу, и все рассыплется».

Песнь сирены

Мифологические сирены поют захватывающие песни с каменистых берегов, навлекая на моряков погибель при кораблекрушении. Их песни содержат секреты, знания прошлого и будущего. Они обещают: «Знаем и то, что на всей происходит земле жизнедарной!» Джейн Эллен Харрисон комментирует: «Странно и прекрасно, что Гомер заставил сирен взывать к духу, а не к плоти».

Мы слышали песнь сирены об объединении.

Глава 18. Объединение: нечеткое видение сквозь стекло

Высшая симметрия, которая объединяет основные частицы, также предсказывает равенство между различными основными взаимодействиями. Это предсказание на первый взгляд совершенно неверно. Однако, когда мы введем поправку на искажающий эффект от флуктуаций Сетки, оно становится ближе к истине.

Мы слышали песнь сирены об объединении. Теперь пришло время открыть глаза и посмотреть, сможем ли мы ориентироваться среди скалистых берегов, где она обитает.

Не-симметрия

Усовершенствованная симметрия объединения многое объясняет. Она собирает разрозненные фрагменты Центральной теории в соразмерное целое. Тем не менее, как только наше зрение отойдет от первого ослепительного впечатления и мы посмотрим более внимательно, нам многое покажется неправильным.

На самом деле неправильным кажется что-то фундаментальное. Если сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия

являются аспектами общего основного мастер-взаимодействия, то симметрия требует, чтобы все они обладали одинаковой силой. Но они ею не обладают. Это показано на рис. 18.1.

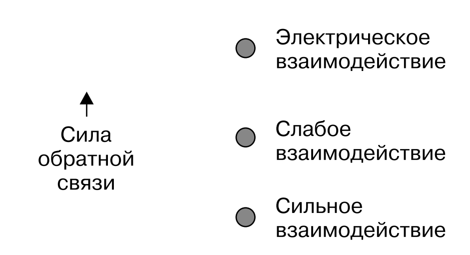


Рис. 18.1. Идеальная симметрия требует того, чтобы сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия имели одинаковую силу. Они ее не имеют. Для дальнейшего удобства здесь я использовал обратный квадрат связей в качестве количественной меры их относительной мощности. Таким образом, сильное взаимодействие, которое является самым мощным, указано внизу

Существует причина, по которой сильное взаимодействие называется сильным, а электромагнитное взаимодействие — нет. Сильное взаимодействие действительно сильнее! Одним из проявлений этого различия является то, что атомные ядра, связанные сильным взаимодействием, намного меньше атомов, которые удерживаются вместе электромагнитными силами. Сильное взаимодействие удерживает ядра более плотно.

Математика Центральной теории позволяет определить точную числовую меру относительной силы разных взаимодействий. Каждое из ее взаимодействий — сильное, слабое, электромагнитное — имеет то, что мы называем параметром связи или просто связью.

В терминах фейнмановских диаграмм эта связь является коэффициентом, на который мы умножаем каждый узел. (Эти универсальные общие коэффициенты связи следуют сразу за чисто численными значениями цветных или электромагнитных зарядов соответствующих частиц, как они закодированы в записях кредитного счета.) Поэтому каждый раз, когда в узле появляется цветной

глюон, мы умножаем вклад изображенного процесса на сильную связь; каждый раз, когда появляется фотон, мы умножаем на электромагнитную связь. Базовая электромагнитная сила возникает из-за обмена фотона (см. рис. 7.4), поэтому она имеет квадрат электромагнитной связи. Аналогично базовое сильное взаимодействие возникает из-за обмена глюона, поэтому оно имеет квадрат сильной связи.

Полная симметрия между силами требует того, чтобы каждый узел был связан с любым другим. Это не допускает разницы между связями. Таким образом, наблюдаемые различия создают серьезную проблему для всей идеи объединения посредством симметрии.

Корректировка видения

Важный урок Центральной теории состоит в том, что сущность, которую мы воспринимаем в качестве пустого пространства, на самом деле является динамичной средой, обладающей структурой и полной активности. Сетка, как мы ее назвали, влияет на свойства того, что в ней находится, то есть всего. Мы видим вещи не такими, какие они есть, а будто сквозь стекло, нечетко. В частности, Сетка кипит виртуальными частицами, и они могут экранировать или антиэкранировать источник. Этот феномен для сильного взаимодействия был центральной идеей повествования в частях I и II. Он имеет место и для других видов взаимодействия.

Таким образом, значения связей, которые мы видим, зависят от того, как мы смотрим. Если мы посмотрим невнимательно, то не сможем различить основные источники, поскольку их изображение будет искажено Сеткой. Другими словами, мы увидим основные источники, смешанные с окружающим их облаком виртуальных частиц. Чтобы судить о том, имеют ли место совершенная симметрия и единство сил, мы должны внести поправку на искажения.

Чтобы разобраться в основах, нам, вероятно, потребуется разрешение очень коротких расстояний и временны́х интервалов. Этот урок повторялся не раз, начиная с ван Левенгука и его микроскопов и заканчивая Фридманом, Кендаллом и Тейлором, использующими ультрастробоскопический наномикроскоп в Стэнфордском центре линейного ускорителя, чтобы заглянуть внутрь протонов, а также экспериментаторами, использующими машину творческого разрушения БЭПК для изучения Сетки. Как мы видели в связи с этими двумя недавними проектами, для определения чрезвычайно коротких расстояний и временных интервалов, на которых в игру вступает квантовая теория, необходимо использовать зонды, которые активно передают большие количества энергии и импульса исследуемому объекту. Именно поэтому ускорители высоких энергий, несмотря на затраты и сложность, являются инструментами выбора.

На грани промаха

Как мы обсуждали в главе 16, облака виртуальных частиц могут увеличиваться медленно. Чтобы облако вокруг кварка выросло из умеренной затравки до угрожающих размеров, оно должно увеличиться с планковской длины до размера протона, то есть в 10^{18} раз!

Учитывая этот опыт, мы не должны удивляться, если обнаружим: чтобы добраться до основ, то есть расстояний, на которых может происходить объединение сил, нам может потребоваться передача немыслимых объемов импульса и энергии. Мощнейший ускоритель БАК обеспечит нам в десять раз лучшее разрешение, то есть разрешение с коэффициентом, равным 10^1, при затратах, составляющих около *10 миллиардов* евро. Далее все становится сложнее.

Поэтому мы должны использовать свой мозг. Хотя он и не очень надежен, но относительно дешев и всегда под рукой (так сказать).

Несколькими росчерками пера мы можем рассчитать эффекты искажения Сетки и внести соответствующие поправки.

Результат показан на рис. 18.2.

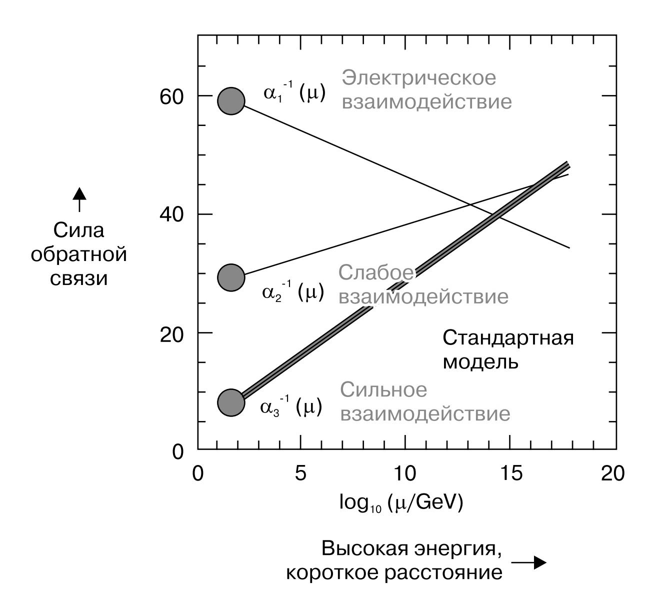


Рис. 18.2. Внесение поправок с учетом искажений Сетки с целью проверить, объединяются ли силы. Когда мы выстраиваем объекты так, что обратные связи, возведенные в квадрат, располагаются по вертикали в восходящем порядке и обозначаются более понятным термином — «нисходящая мощность», а по горизонтали располагаются значения логарифма энергии, или (что то же самое) обратного расстояния, скорректированные связи, рассматриваемые со все увеличивающимся разрешением, создают прямые линии. О величине погрешностей эксперимента можно судить по ширине линий. Это почти работает, но не совсем

Как мог бы сказать Гомер Симпсон: «Ой! Это не совсем то, что нужно. Близко, но не сигара».

Что же делать?

Глава 19. Приближение к истине

Когда привлекательная идея является почти правильной, мы пытаемся сделать ее правильной. Мы ищем способы приблизить ее к истине.

Известный философ Карл Поппер подчеркивал важность опровергаемости в науке. Согласно Попперу, признаком научных теорий является то, что они дают утверждения — предположения, которые могут оказаться ложными. Верно ли утверждение Поппера? Можете ли вы его опровергнуть?

Возможно, это глубокая истина. Репоппизм — противоположность попперизма — говорит, что признаком хорошей научной теории является то, что вы можете сделать ее истинной. Такая теория может ошибаться, но если это хорошая теория, то на этих ошибках вы можете основывать дальнейшие построения.

В важном отношении опровергаемость и возможность приближения к истине являются двумя сторонами одной медали. Обе ценят определенность. Худшая теория, с обеих точек зрения, не есть теория, допускающая ошибки. На ошибках вы можете учиться. Худшая теория — это теория, которая даже не пытается ошибаться, теория, которая одинаково готова ко всему. Если все одинаково возможно, то нет ничего особенно интересного.

С точки зрения нашего иезуитского кредо, которое гласит: «Блаженнее просить прощения, чем разрешения» — опроверга-

емая теория спрашивает разрешения, теория, приближаемая к истине, просит прощения, а ненаучная теория не имеет понятия о грехе.

Идеи распознавания закономерностей и сжатия описаний, которые мы обсуждали ранее, представляют разные точки зрения на эти проблемы (и, я думаю, идут глубже). Если обработка каждого пиксела приводит к среднему оттенку серого, то в результате сырой экспозиции не появится никакого изображения. Аналогичным образом, чтобы распознать закономерности в нашем восприятии физического мира на фоне всего, что можно себе представить, наши кандидаты на звание теории должны отличать возможное от невозможного (в соответствии с теорией). Только в этом случае мы можем их по-разному раскрасить, и только тогда наши наблюдения предоставят нам контрастное изображение, с которым мы можем работать.

Если нам удастся добиться определенности и получить много правильных пикселов, то у нас может сложиться полезный образ даже при наличии нескольких ошибок. (Мы можем отретушировать его с помощью программы Photoshop.) Таким образом, кроме точности мы получаем награду за амбиции, то есть за привнесение в изображение большого количества пикселов (или, пользуясь нашей метафорой, множества фактов).

Достаточно метафор и общностей! Рассмотрим пример приближения к истине.

Повышаем ставки: увеличение степени объединения

Наша смелая попытка объединения сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий не вполне сработала. Нам удалось создать теорию, которая оказалась не просто опровергаемой, но и совершенно ложной. Очень научной, по меркам сэра Карла Поппера. Но почему-то мы остались неудовлетворенными.

Когда такая привлекательная и почти успешная идея кажется не совсем правильной, имеет смысл попытаться ее спасти. Мы ищем способы приблизить ее к истине.

Вероятно, в наших стремлениях к объединению мы были недостаточно амбициозны. Суть объединения различных зарядов такова:

$$\begin{gathered}\text{электрон} \leftrightarrow \text{кварк} \\ \text{фотон} \leftrightarrow \text{глюон.}\end{gathered} \tag{19.1}$$

Это по-прежнему оставляет строительные блоки мира разделенными на два отдельных класса. Можем ли мы пойти дальше? Можем ли мы сделать это?

$$\begin{array}{ccc}\text{электрон} & \leftrightarrow & \text{кварк} \\ \updownarrow & & \updownarrow \\ \text{фотон} & \leftrightarrow & \text{глюон}\end{array} \tag{19.2}$$

Давайте попробуем.

Глава 20. Объединение требует суперсимметрии

Когда мы расширяем физические уравнения, чтобы включить суперсимметрию, мы обогащаем Сетку. Таким образом, мы должны перекалибровать наши расчеты того, как Сетка искажает наше видение объединения. Благодаря такой коррекции в фокусе появляется резкое изображение.

Совершенствуя наши уравнения, мы расширяем мир.

В 1860-х годах Джеймс Клерк Максвелл вывел уравнения для электричества и магнетизма, как они понимались в то время, и обнаружил, что они ведут к противоречиям*. Он видел, что может обеспечить их последовательность путем добавления нового члена слагаемого. Оно, разумеется, соответствует новому физическому эффекту. За несколько лет до Майкла Фарадея в Англии Джозеф Генри в Соединенных Штатах обнаружил, что при изменении во времени магнитные поля создают электрические поля. Новый член в уравнениях Максвелла являлся воплощением обратного эффекта, при котором изменение электрических полей создает магнитные поля. Объединив эти эффекты, мы получаем совершенно новую возможность: изменяющиеся электрические поля создают изменяющиеся магнитные поля, которые создают изменяющиеся электрические поля, которые создают изменяющиеся магнитные поля… Вы можете получить самообновляющееся возмущение,

---

* Я уже упоминал об этом в главе 8. — *Примеч. авт.*

которое живет собственной жизнью. Максвелл видел, что его уравнения имели решения такого рода. Он мог рассчитать скорость, с которой эти возмущения перемещаются в пространстве. И он обнаружил, что они движутся со скоростью света.

Будучи очень сообразительным малым, Максвелл пришел к выводу о том, что эти электромагнитные возмущения *представляют собой* свет. Эта идея жива и по сей день, и у нее существует множество вариантов продуктивного использования. Она остается основой нашего глубочайшего понимания природы света. Но это еще не все. Уравнения Максвелла также имеют решения с меньшими и с большими длинами волн, чем у видимого света. Таким образом, эти уравнения предсказывали существование новых видов вещей — новых видов материи, если хотите, которые в то время не были известны. Это то, что мы сегодня знаем как радиоволны, микроволны, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение, каждое из которых вносит значительный вклад в современную жизнь и является переселенцем из концептуального мира в физический (из к-мира в ф-мир).

В конце 1920-х годов Поль Дирак работал над улучшением уравнения, описывающего электроны в квантовой механике. Несколькими годами ранее Эрвин Шредингер сформулировал уравнение для электрона, которое очень хорошо работало во многих сферах применения. Однако физики-теоретики не были полностью удовлетворены уравнением Шредингера, поскольку оно не подчиняется специальной теории относительности. Оно является квантово-механической версией ньютоновского закона силы и подчиняется старой механической относительности, а не электромагнитной относительности Эйнштейна. Дирак обнаружил, что для получения уравнения, согласующегося со специальной теорией относительности, ему придется использовать уравнение, большее по сравнению с уравнением Шредингера. Как и усовершенствованные уравнения Максвелла для электричества и магнетизма, усовершенствованное уравнение Дирака для электронов предусматривало новые виды

решений: помимо решений, которые соответствуют электронам, движущимся с разными скоростями и вращающимся в разных направлениях, были и другие. После некоторых трудностей и фальстартов и с некоторой помощью Германа Вейля к 1931 году Дирак расшифровал значение этих странных новых решений. Они представляют собой новый вид частиц с той же массой, что и у электрона, но с противоположным зарядом. Именно такая частица была обнаружена вскоре после этого, в 1932 году, Карлом Андерсоном. Мы называем ее антиэлектроном или позитроном. В настоящее время мы используем позитроны для наблюдения за тем, что происходит внутри мозга (позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)).

Существует множество других свежих примеров, когда в наших уравнениях появились новые формы материи еще до их обнаружения в лабораториях. Фактически это стало обычным делом. Кварки — как общая концепция, так и их специфические ароматы *c*, *b* и *t*, цветные глюоны, *W*- и *Z*-бозоны, а также все три вида нейтрино, — сначала были обнаружены в качестве решений уравнений, а позднее — в качестве явления физической реальности.

Продолжается поиск других талантливых обитателей концептуального мира, которые мы хотели бы привлечь в физический мир, в частности частиц Хиггса и аксионов. К сожалению, их подробное описание здесь потребовало бы сделать два серьезных отступления, в то время как наше повествование приближается к кульминации. Вы можете найти дополнительную информацию о них в глоссарии и примечаниях, а о частице Хиггса также в приложении Б.

Для нашей истории наиболее важным из предлагаемых расширений уравнений физики является суперсимметрия, которую часто называют SUSY. Как следует из названия, суперсимметрия предполагает, что мы должны использовать уравнения с большей симметрией.

Новая симметрия SUSY связана с буст-симметрией специальной теории относительности. Как вы помните, буст-симметрия говорит о том, что основные уравнения не меняются, когда вы описываете

эффект от внедрения общей, постоянной скорости для всех компонентов описываемой вами системы. (Дираку пришлось модифицировать уравнение Шредингера, чтобы придать ему это свойство.) Суперсимметрия также говорит о том, что уравнения не меняются, когда вы сообщаете общее движение всем компонентам системы, которую описываете. Однако это совсем другой вид движения по сравнению с тем, который участвует в буст-симметрии. Вместо движения в обычном пространстве с постоянной скоростью суперсимметрия предусматривает движение в новые измерения!

Прежде чем увлечься видениями духовных миров и червоточин в гиперпространстве, позвольте мне добавить, что эти новые измерения имеют совершенно иную природу по сравнению со знакомыми нам измерениями пространства и времени. Это *квантовые* измерения. Тело, когда оно движется в квантовых измерениях, не перемещается, поскольку там нет понятия расстояния; вместо этого изменяется его спин. Эти «супербусты» превращают частицы с заданным значением характерного для них спина в частицы с другим значением спина. Поскольку уравнения должны оставаться неизменными, суперсимметрия связывает свойства частиц с различным спином. SUSY позволяет нам рассматривать их как одну и ту же частицу, движущуюся по-разному сквозь квантовые измерения суперпространства. Квантовые измерения можно представить в виде новых уровней Сетки. Когда частица переходит на такой уровень, ее спин (и ее масса) меняется. Заряды частицы — электрический, цветной и слабый — остаются прежними.

Суперсимметрия может позволить нам завершить работу по объединению Центральной теории. Объединение разных зарядов с помощью симметрии $SO(10)$ свело в общий кластер все калибровочные бозоны, а также объединило в общий кластер все кварки и лептоны. Однако никакая обычная симметрия не способна объединить эти два кластера, поскольку они описывают частицы с разными спинами. Суперсимметрия — это лучшая идея для их объединения.

Поправка поправки

После расширения уравнений физики для включения суперсимметрии мы обнаруживаем, что они предусматривают большее количество решений. Как и в случае с уравнениями Максвелла и Дирака, новые решения представляют собой новые формы материи — новые виды полей и новые виды частиц, которые являются возбуждениями этих полей.

Суперсимметрия требует, грубо говоря, *удвоения* количества полей, имеющихся в наших уравнениях. Наряду с каждым известным нам полем в квантовых измерениях существует новое поле-партнер. Частицы, связанные с этими новыми полями, имеют те же заряды (всех видов), что и их известные партнеры, но различаются значением массы и спина.

Предположение об удвоении мира, основанное на эстетических соображениях*, может показаться безрассудным и нелепым. Возможно, так и есть. Однако введение Дираком антиматерии предполагало аналогичное удвоение, а расширение Максвеллом мира света от видимой полосы до бесконечного пространства электромагнитного спектра было еще более значительным. Изначально обе концепции, по сути, являлись эстетическими уступками. Физики научились быть смелыми. Блаженнее просить прощения, чем разрешения. Итак, покончим с извинениями и вернемся к делу.

Новые частицы-партнеры должны быть тяжелее, чем их наблюдаемые сородичи, иначе они бы уже были обнаружены. Но мы предположим, что они не намного тяжелее, и посмотрим, к чему это приведет**.

---

* Подтверждение в виде поразительного количественного успеха приведено далее. — *Примеч. авт.*

** Дополнительные сведения о количественных аспектах вы можете найти в следующей главе и примечаниях. — *Примеч. авт.*

Колебания в этих новых полях пронизывают Сетку. Они представляют собой новые виды виртуальных частиц, которые вносят вклад в экранирование и антиэкранирование сильных, слабых и электромагнитных источников. Чтобы добраться до основ, имеющих место на коротких расстояниях или высоких уровнях энергии, мы должны скорректировать наше видение, чтобы устранить искажающий эффект этой бурлящей среды. Мы уже пытались произвести такую коррекцию ранее в главе 18 без учета этих возможных новых вкладов. Теперь мы должны скорректировать эту поправку.

Результат показан на рис. 20.1. Благодаря суперсимметрии это работает.

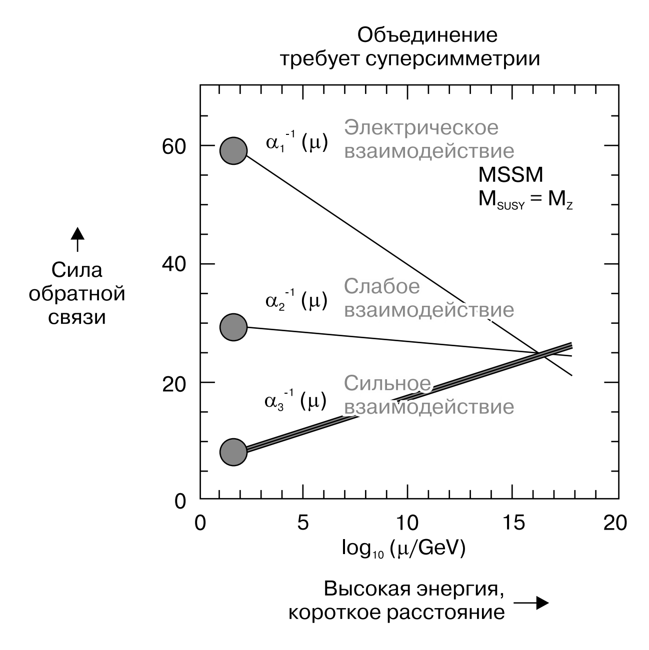


Рис. 20.1. Суперсимметрия требует расширения уравнений физики для включения новых полей. Из-за этих новых полей колебания Сетки искажают наше видение самых базовых физических процессов. После корректировки этих искажений мы обнаруживаем точное объединение на малых расстояниях, или, что то же самое, на высоких уровнях энергии

И гравитация тоже

Мы можем включить в игру и гравитацию. Она, как мы видели, изначально является гораздо более слабой силой по сравнению с другими. Глядя на левую часть рис. 20.1, отражающую расстояния и уровни энергии, к которым мы можем получить доступ на практике, мы видим, что разница в мощности между сильным и электромагнитным взаимодействием примерно десятикратна. Поэтому они легко и аккуратно вписываются в одну картину вместе со слабым взаимодействием. Гравитация же не вписывается в эту картину. Поскольку она слабее и мы отмечаем обратную мощность, гравитация должна отображаться выше других. Однако, чтобы включить ее в таком масштабе, нам придется сделать наш рисунок размером, намного превосходящим размер известной нам Вселенной!

С другой стороны...

Для сил Центральной теории — сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия — корректировки при движении вправо, к гораздо более коротким расстояниям или более высоким уровням энергии, довольно скромны (и помните, что каждая отметка на горизонтальной оси соответствует коэффициенту, равному 10). В конце концов, эти корректировки возникли из-за едва заметного квантово-механического эффекта: экранирования (или антиэкранирования), связанного с колебаниями Сетки. Когда мы рассматриваем гравитацию на очень коротких расстояниях, передавая очень большие количества энергии, изменение оказывается гораздо более радикальным. Как мы уже говорили в главе 3, гравитация непосредственно реагирует на энергию. Ее мощность, как она определяется здесь, пропорциональна квадрату энергии. Учитывая этот эффект, мы можем вычислить гравитацию на малых расстояниях и сравнить ее с другими взаимодействиями.

На рис. 20.2 показан результат. Из-за пределов известной нам Вселенной обратная сила гравитации спускается, чтобы присоединиться к другим взаимодействиям, подходя к ним довольно близко.

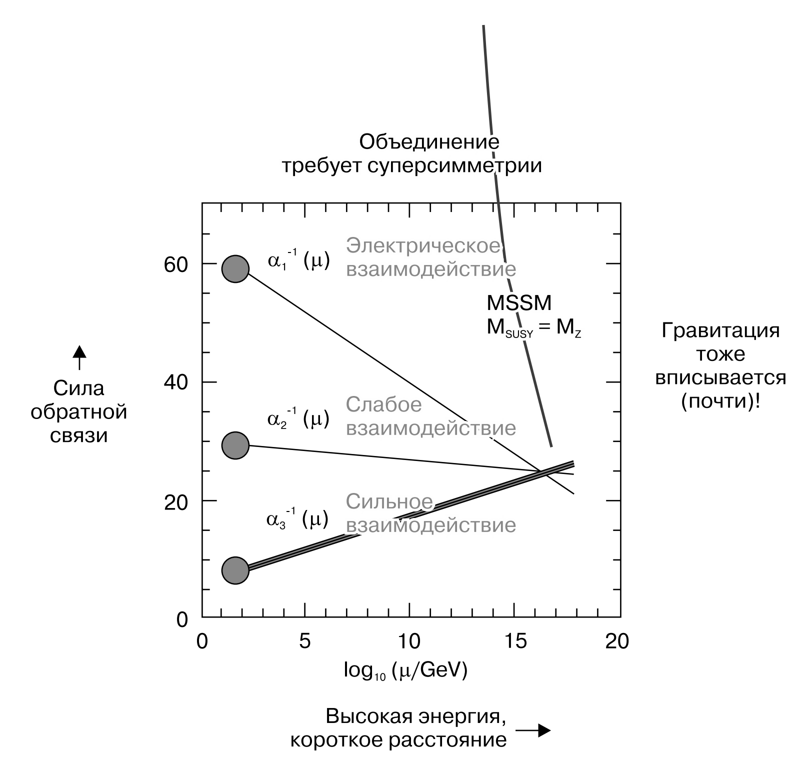


Рис. 20.2. Изначально гравитация смехотворно слаба, но на малых расстояниях ее мощность приближается к мощности других видов взаимодействия; и все они собираются вместе, подходя довольно близко друг к другу

Глава 21. Предчувствие нового золотого века

Мы изложили идею объединения. Пришло время представить ее на окончательный суд Природы. Мы ожидаем вердиктов от ускорителей, из космоса и из-под земли.

Мы видели, что теории основных сил, каждая из которых основана на симметрии, могут быть объединены. Три отдельные Центральные симметрии могут быть реализованы в качестве частей единой, всеобъемлющей симметрии. Более того, эта всеобъемлющая симметрия привносит единство и согласованность в кластеры Центральной теории. Из пестрой шестерки мы собираем безупречный кредитный счет. Мы также обнаружили, что после внесения поправок на искажающий эффект колебаний Сетки, а также включения суперсимметрии (SUSY) различные силы Центральной теории получаются из общего значения на малых расстояниях. Даже гравитация, этот безнадежно слабый и не вписывающийся в общую картину компонент, находит свое место.

Чтобы достичь этой ясной и возвышенной перспективы, мы совершили некоторые смелые скачки в своем воображении. Мы предположили, что Сетка — сущность, которую в повседневной

жизни мы считаем пустым пространством, представляет собой многослойный и многоцветный сверхпроводник. Мы предположили, что мир содержит дополнительные квантовые измерения, необходимые для поддержания суперсимметрии. Кроме того, мы смело применили законы физики, дополненные этими двумя «супер»-предположениями, к уровням энергии и расстояниям, выходящим далеко за пределы того, что мы способны непосредственно проверить.

Достигнутые интеллектуальные успехи — ясность и согласованность видения объединения — заставляют нас верить в то, что наши предположения соответствуют действительности. Однако в мире науки окончательным судьей является Мать-природа.

После того как солнечная экспедиция 1919 года подтвердила предсказание Альберта Эйнштейна об отклонении Солнцем луча света, репортер спросил ученого, что бы означал иной результат. На что Эйнштейн ответил: «Тогда Бог упустил бы прекрасную возможность». Природа не упускает таких возможностей.

Я ожидаю, что приговор Природы в пользу наших «супер»-идей ознаменует начало нового золотого века в фундаментальной физике.

Проект БАК

Недалеко от Женевы, в лаборатории ЦЕРН, протоны будут двигаться по 27-километровому круговому туннелю со скоростью, равной 0,999998 скорости света. В противоположном направлении будут испускаться два плотных луча. Они будут встречаться в четырех точках взаимодействия, в которых детекторы размером с пятиэтажное офисное здание будут отслеживать взрывные результаты столкновений. Это проект Большого адронного коллайдера (БАК) (рис. 21.1).

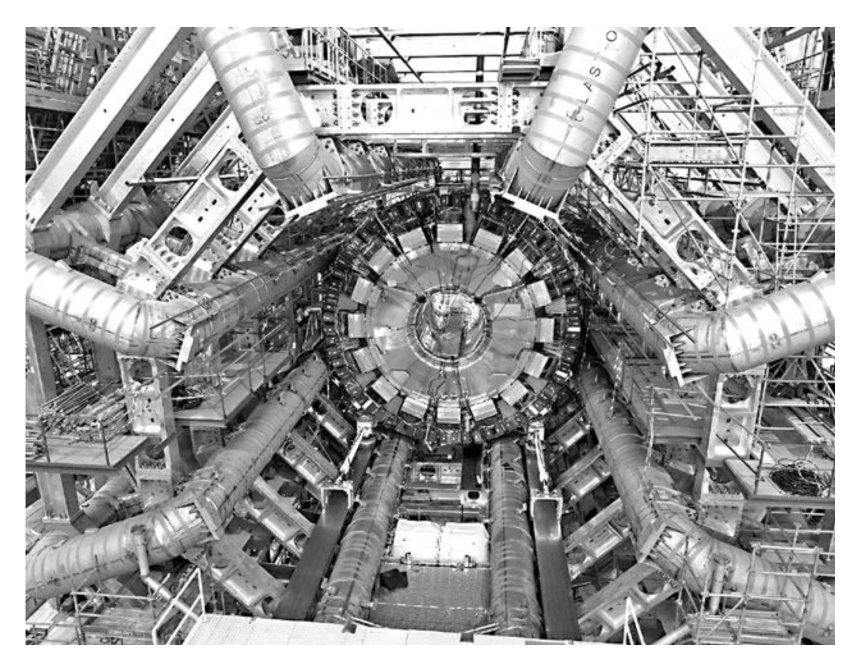


Рис. 21.1. Детектор ATLAS в ЦЕРНе

Огромный размер ускорителя БАК — это ответ нашей цивилизации пирамидам Древнего Египта. Однако по многим параметрам этот памятник является более благородным. Он был порожден любопытством, а не суеверием. Это продукт сотрудничества, а не приказа.

И гигантский масштаб ускорителя БАК является не самоцелью, а побочным эффектом его функции. На самом деле общий физический масштаб проекта не является единственным или даже наиболее впечатляющим из его аспектов. Внутри этого длинного туннеля находятся сложно устроенные и точно выровненные сверхпроводящие магниты. Каждый из этих могущественных гигантов имеет длину 15 метров, но построен с субмиллиметровыми допусками. Электроника обеспечивает необходимый точный

хронометраж. При разделении столкновений и отслеживании частиц подсчитываются наносекунды.

Поток необработанной информации, получаемый в процессе работы ускорителя, является ошеломляющим не только для мозга, но и для компьютерных сетей. Согласно оценкам, ежегодно БАК будет производить 15 петабайт ($1,5 \times 10^{15}$ байт) информации. Это соответствует пропускной способности полумиллиона телефонных разговоров, происходящих одновременно и без остановок. Для обработки этой информации в настоящее время разрабатываются новые архитектуры, которые позволяют тысячам компьютеров по всему миру разделить нагрузку. Это так называемый (компьютерный) Грид-проект.

Ускоритель БАК достигнет достаточно большой концентрации энергии для проверки обоих наших «супер»-предположений.

Мы можем довольно точно оценить, что требуется для выбивания куска конденсата, ответственного за (электрослабую) сверхпроводимость Сетки. Слабое взаимодействие имеет место на коротких, но не бесконечно коротких расстояниях. *W*- и *Z*-бозоны являются тяжелыми, но не бесконечно тяжелыми частицами. Наблюдаемый диапазон взаимодействия и масса его переносчиков обеспечивают нам хорошее понимание жесткости конденсата, ответственного за эти эффекты. Зная жесткость, мы можем оценить, сколько энергии нам нужно сконцентрировать, чтобы оторвать отдельные куски (кванты) конденсата или, выражаясь более прозаично, создать частицу Хиггса, или частицы, или сектор, или что-то другое, что делает Сетку космическим сверхпроводником. Если наши идеи не являются слишком ошибочными, ускоритель БАК справится с этой задачей.

Похожая история и с суперсимметрией. Мы хотим, чтобы колебания Сетки, связанные с новыми полями-суперпартнерами, приводили к объединению сил связи. Если они способны решить

эту задачу, то возбуждения, связанные с этими полями, не могут быть слишком жесткими. Некоторые из их возбуждений — некоторые новые частицы SUSY, партнеры известных нам частиц, — должны быть произведены и обнаружены на ускорителе БАК.

Если частицы-суперпартнеры действительно будут обнаружены, они предоставят нам новые сведения относительно физики объединения. Массы и связи этих частиц, как и основные связи взаимодействий Центральной теории, будут искажены эффектами колебаний Сетки. Однако подробности этих искажений, согласно предположениям, будут определенным образом различаться. Если все пойдет хорошо, то успешный, но изолированный и слабо обоснованный расчет объединения, который мы имеем сегодня, может превратиться в процветающую экосистему взаимодополняющих результатов.

Темная материя в равновесии

К концу XX века физики консолидировали свою чрезвычайно успешную теорию материи — Центральную теорию. Ее компактное, но вместе с тем удивительно полное и точное описание основных законов материи стало венцом многовековой работы.

Однако параллельно с этим астрономы сделали потрясающие новые открытия, которые вернули нам смирение. Они обнаружили, что материя, с которой мы веками имели дело, материя, которую изучает биология, химия, инженерия и геология, материя, из которой состоим мы сами и которая прекрасно описывается нашей Центральной теорией*, — эта обычная материя составляет лишь около 5 % массы всей Вселенной!

---

* Материя, состоящая из фотонов, электронов, кварков и глюонов. — *Примеч. авт.*

Остальные 95 % содержат по крайней мере два компонента, называемые темной энергией и темной материей.

На темную энергию приходится около 70 % массы. Она наблюдалась только по гравитационному влиянию, которое она оказывает на движение обычной материи. Не было замечено, чтобы эта материя излучала или поглощала свет; она является не темной в обычном смысле слова, а прозрачной. Кажется, темная энергия равномерно распределена по всему пространству, причем ее плотность остается постоянной во времени. Теория темной энергии находится в плохом состоянии. Это задача на будущее.

Темная материя составляет около 25 % массы. Она тоже наблюдалась только по гравитационному воздействию, оказываемому на движение обычной материи. Темная материя неравномерно распределена в пространстве, а ее плотность не является постоянной во времени. Она собирается в сгустки, хотя и не такие плотные, как обычная материя. Вокруг каждой тщательно изученной галактики астрономы обнаружили протяженный ореол темной материи. Эти ореолы размыты — в областях, где они перекрываются, их плотность, как правило, в миллион раз меньше плотности обычной материи, однако они занимают гораздо больший объем по сравнению с обычной материей. Вместо того чтобы говорить о галактиках как об объектах, обладающих ореолами, было бы более уместным говорить о галактике, состоящей из обычной материи, как о примеси в темной материи.

Думаю, что проблема темной материи созрела для решения.

Среди новых частиц-партнеров, предсказанных суперсимметрией, одна является особенной — самой легкой. Ее свойства зависят от деталей, относительно которых у нас нет убедительных идей (особенно от конкретных значений масс всех суперсимметричных партнеров). Поэтому мы должны испробовать все возможности. Мы обнаружили, что во многих случаях самый легкий суперсимметричный партнер живет чрезвычайно долго — дольше,

чем Вселенная, — и очень слабо взаимодействует с обычной материей. Однако самым поразительным является то, что, когда мы применяем наши уравнения к Большому взрыву, чтобы увидеть, какая часть этого вещества могла бы сохраниться до сегодняшнего дня, мы обнаруживаем, что она примерно соответствует количеству темной материи. Естественно, все это говорит о том, что самый легкий партнер суперсимметрии — это и есть темная материя.

Поэтому вполне возможно, что, исследуя основные законы физики на сверхкоротких расстояниях, мы отгадаем важную космологическую загадку и начнем избавляться от утомительного смирения. Если появится какая-либо частица — кандидат на звание создателя темной материи, отличной идеей будет проверить, действительно ли этот кандидат справляется с задачей. Что касается теории, то нам нужно будет выявить все реакции, связанные с возникновением темной материи в момент большого взрыва, и произвести вычисления. Что касается эксперимента, мы хотим проверить, действительно ли кандидат является тем, что существует. Когда вы точно знаете, что ищете, найти это становится намного проще.

Существует еще одна многообещающая идея о том, что собой представляет темная материя, которая возникает из другого предложения по улучшению уравнений физики. Как мы уже говорили, КХД в глубоком и буквальном смысле является воплощением симметрии. Существует почти идеальное соответствие между наблюдаемыми свойствами кварков и глюонов и наиболее общими свойствами, допускаемыми цветовой калибровочной симметрией, в рамках специальной теории относительности и квантовой механики. Единственное исключение состоит в том, что установленные симметрии КХД не могут запретить поведение, которое не наблюдается. Установленные симметрии допускают некоторое взаимодействие между глюонами, нарушающее инвариантность уравнений КХД при изменении направления

времени. Эксперименты серьезно ограничивают возможную силу этого взаимодействия. Эти пределы являются намного более жесткими по сравнению с тем, что можно было бы ожидать при случайном возникновении.

Центральная теория не объясняет это «совпадение». Роберто Печчеи и Хелен Куинн нашли способ расширить уравнения, который мог бы его объяснить. Стивен Вайнберг и я независимо друг от друга показали, что расширенные уравнения предсказывают существование новых, очень легких, очень слабо взаимодействующих частиц, называемых аксионами. Аксионы также являются серьезными кандидатами на то, чтобы считаться ответственными за происхождение космологической темной материи. В принципе, их можно наблюдать различными способами. Хотя ни один из них не является легким, поэтому охота продолжается.

Возможно также, что обе идеи правильны и оба вида частиц вносят вклад в общее количество темной материи. Было бы здорово, не правда ли?

Один ботинок упал, ждем других

Объединение сил Центральной теории создает большую симметрию, а большая симметрия создает дополнительные силы. Мы постулируем второй, более жесткий слой космической сверхпроводимости, чтобы объяснить, как подавляются дополнительные силы, которые мы не наблюдали*. Однако мы не хотим подавлять их полностью. В масштабах объединения — на высоких уровнях энергии, или, что то же самое, на коротких расстояниях — и за их пределами эти новые взаимодействия объединены с компонентами Центральной теории и обладают такой же силой.

---

* Более подробное описание этой темы вы можете найти в приложении Б. — *Примеч. авт.*

Квантовые флуктуации — виртуальные частицы, которые достигают этих необыкновенных уровней энергии, крайне редки, но они действительно происходят. Соответственно, эффекты, которые эти флуктуации катализируют, согласно предсказаниям, должны быть очень маленькими, но не нулевыми. Два из этих эффектов настолько необычны и неожиданны, что они считаются классическими признаками физики объединения.

- Нейтрино должны приобретать массу.
- Протоны должны распадаться.

Мы слышали, как упал первый ботинок. Как говорилось ранее, нейтрино действительно имеют очень малые, но ненулевые массы. Наблюдаемые значения этих масс в целом соответствуют ожиданиям от объединения.

Мы ждем падения другого ботинка. Глубоко под землей гигантские фотоприемники наблюдают за огромными чанами с охлажденной водой в поисках вспышек, которые будут сигнализировать о смерти протонов. Согласно нашим оценкам скорости распада протонов, это открытие не за горами. Если так, то оно откроет еще один путь к физике объединения, возможно, самый прямой и мощный. Ибо протоны могут распадаться многими способами, а скорости для различных возможностей непосредственно отражают новые взаимодействия, возникающие в результате объединения.

Объединение взаимодействий Центральной теории — сильного, слабого и электромагнитного — в единую унифицированную теорию предполагает некоторые догадки, однако его принципы ясны. Квантовая механика, специальная теория относительности и (локальная) симметрия прекрасно сочетаются друг с другом. Как мы видели, используя их, мы можем сделать определенные предложения для экспериментального исследования, включая количественные оценки прогнозируемых эффектов.

Мы также видели, что объединение с гравитацией хорошо работает и на уровне сравнения их фундаментальной силы. Однако наши представления о единой теории отнюдь не являются конкретными. Идеи относительно теории суперструн кажутся многообещающими, однако никому еще не удалось достаточно их разработать, чтобы конкретно указать на то, каких новых эффектов следует ожидать. Какие ботинки упадут при объединении с гравитацией? Можем ли мы надеяться на то, что услышим звук их падения? Это тоже вопрос на будущее.

Эпилог. Гладкий камешек, красивая раковина

Сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на морском берегу и развлекающимся тем, что до поры до времени отыскиваю камешек более цветистый, чем обыкновенно, или красивую раковину, в то время как великий океан истины расстилается передо мной неисследованным. *(Исаак Ньютон)*

Преодолев третий пик, мы достигли естественной точки привала. Пришло время отдохнуть, оглянуться назад и осмотреть пейзаж.

Глядя на долину повседневной реальности, мы воспринимаем гораздо больше, чем раньше. Под знакомым спокойствием и прочностью материи в пустом пространстве наш ум представляет себе танец замысловатых узоров в вездесущей, всеобъемлющей кипучей среде. Мы понимаем, что масса, само качество, делающее материал инертным и контролируемым, возникает из энергии кварков и глюонов, движущихся со скоростью света и вынужденных держаться вместе, чтобы защитить друг друга от ударов этой среды.

Наше вещество представляет собой гул странной музыки, математической музыки, более точной и сложной, чем фуга Баха, — Музыки Сетки.

Нам кажется, что сквозь пестрые облака вдали виднеется математический Рай, в котором составляющие реальность элементы избавляются от своего несовершенства. Исправляя искажения нашего повседневного восприятия, мы пытаемся в своем сознании увидеть, какими они могут быть на самом деле: чистыми и идеальными, симметричными, равными и совершенными.

Или все наши фантазии — это просто химера? Мы наводим свой телескоп и ждем, пока облака рассеются.

Отдадим должное массе

Впереди лежат другие горы, вершины которых мы пока не можем различить.

Как и было обещано, я объяснил происхождение 95 % массы обычного вещества из энергии безмассовых строительных блоков, используя второй закон Эйнштейна $m = E / c^2$. Теперь настало время отдать должное тому, что я не смог объяснить.

Масса электрона, хотя и составляет гораздо меньше 1 % от общей массы обычного вещества, имеет огромную важность. Величина этой массы определяет размер атомов. Если бы вы удвоили массу электрона, размер всех атомов сократился бы вдвое; если бы вы уменьшили массу электрона вдвое, все атомы увеличились бы в два раза. Кроме того, могли бы произойти и другие вещи, которые сделали бы невозможной жизнь, как мы ее знаем. Если бы электроны были тяжелее в четыре раза или около того, то им было бы выгодно объединяться с протонами, создавая нейтроны, испускающие нейтрино. Это было бы концом для химии, не говоря

уже о биологии, поскольку не существовало бы ни электрически заряженных ядер, ни электронов, доступных для создания атомов и сложных молекул.

И все же, мы пока не вполне представляем, почему электроны весят столько, сколько они весят. Нет никаких доказательств того, что электроны имеют внутреннюю структуру (и есть множество доказательств обратного), поэтому то объяснение, которое мы вывели для протонов, связывающее их массу с внутренней энергией, здесь не сработает. Нам нужны новые идеи. В настоящее время лучшее, что мы можем сделать, — это учесть массу электрона в качестве параметра в наших уравнениях, который мы не можем выразить в терминах чего-либо более простого.

Похожая история и с массами наших друзей — верхнего и нижнего кварков, *u* и *d*. Они делают количественно малый, но качественно решающий вклад в массы протонов и нейтронов, следовательно, в массу обычной материи. Если бы значения их масс существенно различались, жизнь могла бы стать трудной или вовсе невозможной. Тем не менее мы не можем объяснить, почему их значения именно такие, какие они есть.

Мы также не понимаем значений масс более тяжелых, неустойчивых клонов электрона, то есть мюона (μ) и тау-лептона (τ), которые соответственно в 209 и 3478 раз тяжелее электронов. Мы не знаем, откуда берутся значения 209 и 3478. То же самое относится к более тяжелым, нестабильным клонам верхнего кварка, то есть к очарованному *(c)* и истинному *(t)* кваркам; и к более тяжелым, неустойчивым клонам нижнего кварка — странному *(s)* и прелестному *(b)*.

Единственная хорошая новость в этом фиаско заключается в том, что все эти кварки и лептоны, по-видимому, тесно связаны друг с другом, как в плане их наблюдаемых свойств, так и теоретически в рамках единых теорий, которые мы обсуждали в предыдущих

главах. Поэтому если нам удастся понять одно — и если эти единые теории правильны! — мы сможем понять все остальное.

Тот факт, что мы совершенно невежественны в деле происхождения масс кварков, означает, что мое объяснение слабости гравитации, основанное на легкости протонов по сравнению с массой Планка, не является полным. Я посчитал само собой разумеющимся то, что большая часть массы протона возникает из энергии содержащихся в нем кварков и глюонов согласно второму закону Эйнштейна. И именно так в Природе и происходит: *u*- и *d*-кварки действительно имеют крошечные массы, много меньше массы протона, поэтому их прямой вклад в массу протона очень мал относительно массы, возникающей из энергии. Но если вы спросите меня, *почему* массы кварков настолько малы, я не смогу вам точно ответить (хотя я и мог бы рассказать несколько сказок).

Кроме того, существует еще частица Хиггса, иногда называемая «происхождением массы» или даже «частицей Бога». В приложении Б я набросал несколько неплохих идей, касающихся частицы Хиггса. Если коротко, то поле Хиггса (более фундаментальное, чем частица) позволяет нам реализовать наше видение универсального космического сверхпроводника и воплощает красивую концепцию спонтанного нарушения симметрии. Эти идеи являются глубокими, странными, славными и, вероятно, верными. Но они не объясняют ни происхождение массы, ни, конечно же, Бога. Несмотря на то что мы можем с уверенностью сказать, что поле Хиггса позволяет нам примирить существование определенных видов масс с деталями того, как работают слабые взаимодействия, это далеко от объяснения происхождения массы или того, почему разные массы имеют именно такие значения. И, как мы видели, происхождение большей части массы обычной материи не имеет ничего общего с частицами Хиггса.

Мы также не понимаем, откуда берется масса нейтрино. И мы *действительно* не понимаем происхождения массы многочисленных частиц, которые присутствуют в наших теориях, но еще не наблюдались, включая частицу или частицы Хиггса, все частицы, связанные с суперсимметрией, аксионы и т. д.

Чтобы более коротко изложить суть ситуации, можно было бы сказать, что единственный случай, в котором мы понимаем происхождение массы, — это тот, о котором я рассказал в этой книге. К счастью, это понимание охватывает львиную долю массы обычного вещества — материи, состоящей из электронов, фотонов, кварков и глюонов, — материи, которая доминирует в нашей непосредственной окружающей среде, материи, которую изучает биология и химия, материи, из которых состоим мы с вами.

Назад во тьму

Великим, а возможно, и величайшим открытием астрономии было то, что далекие звезды и туманности состоят из точно такого же вещества, что мы находим на Земле. Однако в последние десятилетия астрономы частично опровергли эту базовую истину. Они обнаружили, что источником примерно 95 % массы Вселенной является что-то другое. Новые формы материи, не состоящие из электронов, фотонов, кварков и глюонов, ответственны за 95 % массы Вселенной.

Новое вещество встречается по крайней мере в двух разновидностях, называемых темной материей и темной энергией. Это не очень подходящие названия, потому что одной из немногих вещей, которые мы знаем об этом веществе, является то, что оно не темное — оно не поглощает свет в какой-либо заметной степени. Не наблюдалось и излучение света этим веществом. Оно кажется совершенно прозрачным. Не наблюдалось

также, что это вещество испускает протоны, электроны, нейтрино или космические лучи любого рода. Короче говоря, и темная материя, и темная энергия взаимодействуют с обычной материей очень слабо, если вообще взаимодействуют. Обнаружить их можно единственным способом — по гравитационному влиянию на орбиты обычных звезд и галактик, то есть того, что мы видим.

О темной материи мы знаем очень мало. Она может состоять из суперсимметричных частиц, как я говорил ранее, или из аксионов. (Мне очень нравятся аксионы, отчасти потому, что я дал им название. Я использовал эту возможность, чтобы исполнить мечту своей юности. Я заметил стиральный порошок под названием Axion, которое звучало для меня как название частицы. Поэтому, когда в теории возникла частица, которая *очищала* теорию от проблемы *аксиального* тока, я воспринял это как знак свыше. Проблема заключалась в том, чтобы проскочить мимо печально известных консервативных редакторов журнала Physical Review Letters. Я сказал им об аксиальном токе, но не о стиральном порошке, и это сработало.) Проводятся смелые эксперименты, и, если повезет, то через несколько лет у нас будет гораздо более четкое представление о том, что собой представляет темная материя.

О темной энергии нам известно еще меньше. Похоже, что она распределена совершенно равномерно, с одинаковой плотностью везде и всегда, как если бы она представляла собой неотъемлемое свойство пространства-времени. В отличие от любого обычного вида материи (даже суперсимметричных частиц или аксионов) темная энергия оказывает отрицательное давление. Она пытается разорвать вас! К счастью, несмотря на то, что на темную энергию приходится примерно 70 % массы всей Вселенной, ее плотность составляет всего лишь около 7×10^{-30} плотности воды,

а ее отрицательное давление отменяет лишь 7×10^{-14} нормального атмосферного давления — меньше, чем триллионную часть. Я не знаю, когда у нас будут более четкие представления о том, что такое темная энергия. Думаю, не очень скоро. Но надеюсь, что я ошибаюсь.

Последнее слово

Я показал вам свой самый гладкий камешек, самую красивую раковину и непознанный океан. Надеюсь, они вам понравились. В конце концов, это ваш мир.

Приложение А. Частицы имеют массу, а мир — энергию

Как мы обсуждали в главе 3, закон $E = mc^2$ выполняется для изолированных тел в состоянии покоя. Для движущихся тел правильным уравнением, связывающим массу с энергией, является:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где v — скорость.

Для покоящегося тела ($v = 0$) это уравнение превращается в $E = mc^2$.

Когда тело, например протон или электрон, ускоряется, скорость (v) обычно изменяется, но масса (m) остается неизменной. Следовательно, в соответствии с уравнением изменяется энергия (E).

На первый взгляд это может показаться противоположным тому, о чем говорится в книге. Мы сказали, что сохраняется *энергия*, а не *масса*. В чем проблема?

Сохранение энергии касается систем, а не отдельных тел. Совокупная энергия системы тел включает энергию движения (заданную формулой выше) и члены «потенциальной энергии», которые отражают взаимодействия между телами. Компоненты потенциальной энергии задаются другими формулами, которые зависят от расстояний между телами, их электрических зарядов и, возможно, от других вещей. Сохраняется только совокупная энергия.

Изолированное тело имеет постоянную скорость. Это первый закон движения Ньютона, который, в отличие от его нулевого закона, все еще кажется действительным. Когда тело изолировано, мы можем рассматривать его как систему. Таким образом, энергия тела должна сохраняться, и, согласно формуле, так и есть.

И наоборот, когда изменяется скорость тела, само это изменение является сигналом того, что оно не изолировано. Видимо, какое-то другое тело воздействует на него, что обусловливает изменение скорости. Действие одного тела на другое, как правило, передает энергию между ними. Сохраняется только совокупная энергия, а не энергия каждого тела в отдельности.

Когда мы создаем протон из кварков и глюонов, эти концепции объединяются. С фундаментальной точки зрения покоящийся протон представляет собой сложную систему из взаимодействующих кварков и глюонов. По отдельности кварки и глюоны имеют очень малую массу. Это, однако, не мешает всей системе иметь значительную энергию. Назовем ее E. Она сохраняется во времени, пока вся система, то есть протон, остается изолированной. В качестве альтернативы мы можем рассматривать изолированный протон как черный ящик: «тело» с массой m. Эти две величины, возникающие в альтернативных описаниях, связаны соотношением $E = mc^2$ (или $m = E / c^2$).

В главе 2 мы рассмотрели драматическое нарушение закона сохранения массы. Электрон и позитрон аннигилируют, и на выходе получается набор частиц, суммарная масса которых в 30 000 раз превышает массу исходных. Тем не менее энергия сохраняется. Скорости исходного электрона и позитрона были очень близки к скорости света. Поэтому согласно общему уравнению массы-энергии их энергия очень велика — намного больше mc^2. Частицы, которые возникают в результате столкновения, хотя и являются более массивными, движутся немного медленнее. Когда вы складываете их энергии, рассчитанные по уравнению массы-энергии, сумма соответствует совокупной энергии исходного электрона и позитрона. (Как только частицы вылетают и разделяются, взаимодействие, или потенциальная энергия, становится пренебрежимо мало.)

Наконец, чтобы завершить обсуждение отношения между массой и энергией, мы должны рассмотреть конкретный случай частиц с нулевой массой. Важными примерами являются фотоны, цветные глюоны и гравитоны. Такие частицы движутся со скоростью света. Если мы попытаемся включить в наше общее уравнение массы-энергии $m = 0$ и $v = c$, то и числитель, и знаменатель в правой части обнуляются и мы получаем бессмысленное отношение $E = 0/0$. Правильный результат состоит в том, что энергия фотона может иметь любое значение. Фотоны с различной энергией не отличаются ни по скорости, которая всегда является скоростью света c, ни, разумеется, по массе, которая всегда обращается в ноль, но по частоте (то есть по скорости, с которой колеблются лежащие в основе электрическое и магнитное поля). Энергия фотона E пропорциональна частоте ν света, который он представляет. Если точнее, то они связаны уравнением Планка — Эйнштейна — Шрёдингера $E = h\nu$, где h — это постоянная Планка.

Для фотонов в видимом диапазоне мы ощущаем это различие как различие в цвете: фотоны в красном конце спектра имеют наименьшую энергию, фотоны в синем конце спектра — самые большие. За пределами видимого спектра при уменьшении энергии мы встречаем инфракрасные, микроволновые и радиоволновые фотоны, а при увеличении — ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи.

Приложение Б. Многослойный многоцветный космический сверхпроводник

Мы живем внутри удивительного сверхпроводника, скрывающего симметрию мира.

Самым фундаментальным свойством сверхпроводников является не то, что они очень хорошо проводят электричество (хотя так и есть). Наиболее фундаментальное свойство было открыто Вальтером Мейсснером и Робертом Оксенфельдом в 1933 году. Оно называется эффектом Мейсснера. Мейсснер и Оксенфельд обнаружили, что магнитные поля не могут проникать внутрь сверхпроводников и ограничены тонким поверхностным слоем. Сверхпроводники «не выносят» магнитные поля. Это их фундаментальное свойство.

Сверхпроводники получили свое название благодаря более очевидному и впечатляющему свойству — их особому таланту поддержания электрических токов. Сверхпроводники могут пропускать электрические токи, которые протекают без сопротивления и, следовательно, существуют неограниченное время, даже без

батареи, которая бы их питала. Далее проследим связь между эффектом Мейсснера и такой сверхпроводящей способностью.

Если мы подвергнем сверхпроводящее тело влиянию внешнего магнитного поля, то, согласно эффекту Мейсснера, это тело должно найти способ нейтрализовать магнитное поле так, чтобы внутри него поля не было. Тело может обеспечить это только путем создания собственного равного и противоположного магнитного поля. Однако магнитные поля генерируются токами. Чтобы сгенерировать магнитное поле, которое обнуляет общее поле, сверхпроводящее тело должно быть способно поддерживать токи, которые сохраняются бесконечно долго.

Таким образом, возможность «суперпотока» электрического тока обусловлена эффектом Мейсснера. Эффект Мейсснера является фундаментальным. Это истинный признак сверхпроводника.

Эффект Мейсснера распространяется не только на реальные магнитные поля, но и на те, которые возникают как квантовые флуктуации. Таким образом, свойства виртуальных фотонов, которые представляют собой колебания электрического и магнитного полей, изменяются внутри сверхпроводника. Сверхпроводник делает все возможное, чтобы нейтрализовать эти колеблющиеся магнитные поля. Как следствие, виртуальные фотоны внутри сверхпроводника являются более редкими и распространяются на меньшие расстояния, чем в пустом* пространстве.

В представлении мира, основанном на Сетке, электрические и магнитные силы возникают в результате взаимодействия между заряженными источниками и виртуальными фотонами, также называемыми флуктуациями поля. Частица А влияет на флуктуации поля вокруг нее, что также влияет на другую частицу В. В этом заключается наше самое фундаментальное представление того, как возникает взаимодействие между частицами А и В. Это то, что вы видите на базовой диаграмме Фейнмана (см. рис. 7.4).

---

* То есть в «пустом». — *Примеч. авт.*

Поэтому тот факт, что флуктуации поля внутри сверхпроводника становятся редкими и короткодействующими, означает, что соответствующие электрические и магнитные силы эффективно ослабевают и перестают действовать на большие расстояния.

Обнуляющие поля сверхтоки также усложняют реальным фотонам жизнь внутри сверхпроводников. Требуется больше энергии для самовосстановления полевых возмущений, которые, как мы узнали, представляют собой фотоны. В уравнениях этот эффект проявляется как ненулевая масса фотонов. Короче говоря, внутри сверхпроводников фотоны являются тяжелыми.

Космическая сверхпроводимость: электрослабый слой

Слабое взаимодействие — это короткодействующая сила. Поля, ответственные за эту силу, *W* и *Z*, во многом подобны электромагнитному полю. Частицы, возникающие как возмущения в этих полях — *W*- и *Z*-частицы, — напоминают фотоны. Подобно фотонам, они являются бозонами. Как и фотоны, они реагируют на заряды, но не на электрические заряды, а на то, что мы называем зелеными и фиолетовыми зарядами с похожими физическими свойствами. Их наиболее очевидное отличие от фотонов состоит в том, что *W*- и *Z*-бозоны являются тяжелыми частицами. (Вес каждой из них равен весу 100 протонов.)

Короткодействующая сила. Тяжелые частицы. Звучит знакомо? А должно. Это как раз свойства электромагнитных сил и фотонов внутри сверхпроводников.

Современная теория электрослабых взаимодействий в значительной степени связана с аналогией между тем, что происходит с фотонами внутри сверхпроводников, и наблюдаемыми свойствами *W*- и *Z*-бозонов в космосе. Согласно этой части Центральной теории сущность, которую мы воспринимаем как пустое пространство, то есть Сетка, представляет собой сверхпроводник.

Несмотря на глубину концептуальных и математических параллелей, сверхпроводимость Сетки отличается от обычной сверхпроводимости в четырех отношениях.

- **Присутствие.** Обычная сверхпроводимость требует особых материалов и низких температур. Даже для новых «высокотемпературных» сверхпроводников максимальная температура не превышает 200 K (комнатная температура составляет около 300 K).

  Сверхпроводимость сетки присутствует повсюду, и ее нарушения никогда не наблюдалось. Теоретически она должна сохраняться примерно до 10^{16} K.
- **Масштаб.** Масса фотона внутри обычного сверхпроводника составляет 10^{-11} массы протона или меньше.

  Массы *W* и *Z* составляют около 10^2 массы протонов.
- **Токи.** Сверхтоки обычной сверхпроводимости — это потоки электрического заряда. Они приводят к тому, что электромагнитные поля становятся короткодействующими, а фотоны приобретают массу.

  Сверхтоки сверхпроводимости Сетки — это коррелированные потоки гораздо менее знакомых типов заряда: фиолетового слабого заряда и гиперзаряда. Поля *W* и *Z* могут генерироваться этими потоками, поэтому силы, генерируемые полями *W* и *Z*, становятся короткодействующими, а частицы *W* и *Z* приобретают массу.
- **Субстрат.** Хотя многие детали остаются неизвестными, мы в общем понимаем, как работают обычные сверхпроводники. (Для многих сверхпроводящих материалов у нас есть довольно детальная и точная теория; для других, в том числе для так называемых высокотемпературных сверхпроводников, разработка теорий продолжается.) В частности, мы знаем, из чего состоят их сверхтоки. Сверхтоки — это потоки электронов, организованные в так называемые куперовские пары.

Напротив, у нас нет надежной теории относительно того, из чего состоят сверхтоки Сетки. Ни одно из полей, наблюдавшихся нами до сегодняшнего дня, не обладает подходящими свойствами. Теоретически возможно, что за все ответственно одно новое поле, так называемое поле Хиггса, и сопутствующая ему одноименная частица. Возможно также участие нескольких полей. В теориях с суперсимметрией, которые в значительной степени проявились в наших идеях об объединении, есть по меньшей мере два поля, делающих вклад в сверхтоки, и как минимум пять связанных с ними частиц. (Выражаясь языком главы 8, существует два конденсата и пять различных полевых возмущений.) Все может оказаться еще сложнее. Мы не знаем. Экспериментальная проверка этих вопросов является основной целью проекта БАК.

Сверхпроводимость Сетки не связана с сильными цветными зарядами, поэтому сильные цветные глюоны остаются незатронутыми и обладают нулевой массой. Не влияет она и на фотоны. В отличие от полей *W* и *Z*, которые в значительной степени подавляются и становятся короткодействующими из-за обнуляющих поля сверхтоков, фотоны остаются безмассовыми. К счастью для нас, поскольку наши электрические и электронные технологии, не говоря уже о нашем химическом бытии, опираются на энергичные электромагнитные силы, сверхтоки Сетки являются электрически нейтральными.

Космическая сверхпроводимость: сильнослабый слой

Мы можем продвинуть эти идеи на важный шаг вперед.

Главный вклад сверхпроводимости Сетки в Центральную электрослабую теорию состоит в объяснении того, почему слабое взаимодействие кажется намного слабее и туманнее по сравнению с электромагнитным, хотя они и находятся почти на одинаковых основаниях в фундаментальных уравнениях. (Действительно, как

мы уже говорили, слабое взаимодействие, в сущности, является несколько более мощным.) В терминах симметрии Центральной теории она показывает нам возможность объяснения редукции:

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3) \times U(1)$$

от фундаментальных симметрий Центральной теории (сильное × × слабое × гиперзаряд) до тех, которые имеют долгосрочные последствия (сильное × электромагнитное).

В наших единых теориях мы работаем с гораздо большими группами симметрии, чем группа Центральной теории $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, например с $SO(10)$. Большая симметрия предоставляет больше возможностей для преобразований среди различных видов зарядов и больше видов глюон/фотон/W, Z-подобных калибровочных частиц, которые эти преобразования реализуют.

Дополнительные калибровочные частицы способны делать то, что редко, если вообще когда-либо, случается в реальности. Например, преобразуя единицу слабого цветного заряда в единицу сильного цветного заряда, мы можем превратить кварк в лептон или антикварк. Кредитный счет полон таких возможностей. Поэтому мы можем легко генерировать, например, распад:

$$p \rightarrow e^{+} + \gamma$$

протонов на позитроны и фотоны. Если бы этот распад произошел со скоростью, примерно соответствующей скорости обычного слабого взаимодействия, то это заняло бы небольшую долю секунды. У нас были бы серьезные проблемы, поскольку наши тела быстро испарились бы в электронно-позитронную плазму.

Мы можем подавлять нежелательные процессы, сохраняя при этом основополагающую унифицирующую симметрию и используя новый слой сверхпроводимости Сетки. Тогда по мере продвижения от очень малых до больших расстояний мы обеспечим уменьшение активных (неподавленных) полей согласно:

$$SO(10) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(3) \times U(1).$$

Второй шаг представляет собой то, что мы уже получили в рамках Центральной теории.

Для первого шага нам нужны гораздо более эффективные сверхтоки Сетки. Они должны мощно подавлять нежелательные сильные ↔ слабые преобразования цветовых зарядов. Конечно, это означает, что сами сверхтоки являются потоками, включающими как сильные, так и слабые цветовые заряды.

Ни одна из известных форм материи не может обеспечить таких сверхтоков. С другой стороны, легко изобрести новые поля наподобие хиггсовского, которые способны справиться с этой работой. Люди играли и с другими идеями. Может быть, эти токи возникают из-за частичек, мечущихся в дополнительных крохотных свернутых пространственных измерениях. Возможно, это вибрации струн, обернутых вокруг крошечных свернутых пространственных измерений. Поскольку концентрированные энергии, необходимые для исследования таких малых расстояний, выходят далеко за пределы того, что мы можем достичь на практике, эти догадки проверить нелегко.

К счастью, как и в Центральной теории электрослабого взаимодействия, мы можем добиться многого, приняв сверхтоки как данность и не придумывая гипотез о том, из чего они состоят. Я прибег к этой философии в третьей части данной книги. Это позволило нам достичь некоторых обнадеживающих успехов и сделать некоторые конкретные предположения. Если эта идея переживет дальнейшие проверки, мы сможем с уверенностью утверждать, что живем внутри многослойного многоцветного космического сверхпроводника.

Приложение В. От «не-ошибочного» к (возможно) правильному

Савас Димопулос всегда бывает захвачен какой-нибудь идеей, и весной 1981 года это была суперсимметрия. Он посетил новый Институт теоретической физики в Санта-Барбаре, сотрудником которого я недавно стал. Мы моментально нашли общий язык — он был полон диких идей, а мне нравилось напрягать мозг, пытаясь отнестись к некоторым из них серьезно.

Суперсимметрия была (и остается) прекрасной математической идеей. Проблема ее применения заключается в том, что она слишком хороша для этого мира. Мы просто не находим частиц того типа, который она прогнозирует. Например, мы не видим частиц с тем же зарядом и массой, что и электроны, но с другим значением спина.

Однако принципы симметрии, которые могли бы помочь объединить фундаментальную физику, трудно найти, поэтому физики-теоретики не откажутся от них просто так. Основываясь на предыдущем опыте с другими формами симметрии, мы разработали резервную стратегию, называемую спонтанным нарушением симметрии. При этом подходе мы постулируем, что фундаментальные уравнения физики имеют симметрию, а стабильные решения этих

уравнений ее не имеют. Классический пример данного явления имеет место в обычном магните. В основных уравнениях, описывающих физику куска железа, любое направление эквивалентно любому другому, но кусок железа превращается в магнит с некоторым определенным, направленным к северу полюсом.

Простой и знакомый пример спонтанного нарушения симметрии связан с левосторонним и правосторонним дорожным движением. Не важно, по какой именно стороне улицы едут машины — главное, чтобы все ехали по одной и той же стороне. Если большинство едут по левой стороне, но кто-то — по правой, то возникает нестабильная ситуация. В таком случае симметрия между правой и левой стороной улицы оказывается нарушена. Разумеется, в разных вселенных (назовем их «Великобритания» и «США»), ситуация может отличаться.

Исследование возможностей, открываемых спонтанно нарушаемой суперсимметрией, требует построения модели — творческой деятельности, связанной с предложением уравнений-кандидатов и анализом их последствий. Построение моделей со спонтанно нарушаемой суперсимметрией, которые согласуются со всем остальным, что мы знаем о физике, — это сложное дело. Даже если вам удастся обеспечить нарушение симметрии, лишние частицы никуда не денутся (только станут тяжелее) и будут наносить разнообразный вред. Я попробовал свои силы в создании моделей, когда идея суперсимметрии была впервые разработана в середине 1970-х годов, но сдался после нескольких неудачных попыток.

Савас был гораздо более одаренным в плане построения моделей в двух важнейших отношениях: он не настаивал на простоте и не сдавался. Когда я определил конкретную проблему (назовем ее А), которая не была затронута в его модели дня, он сказал: «Это не настоящая проблема, я уверен, что смогу решить ее», а на следующий день он приходил с более сложной моделью, в которой проблема А была решена. Тогда мы обсуждали проблему Б, и он решал ее с помощью совершенно другой сложной модели. Для решения

проблем А и Б вы должны были соединить две модели, придя к проблеме В, и вскоре все становилось невероятно сложным. Прорабатывая детали, мы находили какой-нибудь изъян. На следующий день Савас приходил очень взволнованным и счастливым с еще более сложной моделью, которая исправляла изъян, найденный накануне. В конце концов, мы устраняли все недостатки, используя доказательство методом исчерпания — любой, включая нас, кто попытался бы проанализировать модель, исчерпал бы все силы, прежде чем понял ее достаточно хорошо, чтобы найти в ней изъяны.

Когда я попытался подготовить нашу работу к публикации, у нас возникло определенное чувство нереальности и смущения из-за сложности и своевольности того, что мы придумали. Саваса это не устрашило. Он даже утверждал, что некоторые существующие идеи об объединении с использованием калибровочной симметрии, которые мне казались действительно продуктивными, на самом деле не были такими уж элегантными, если вы пытались быть реалистом и подробно их проработать. Фактически он разговаривал с другим коллегой, Стюартом Раби, о попытках улучшения этих моделей за счет включения суперсимметрии! Я скептически относился к этому «улучшению», поскольку был уверен, что дополнительная сложность, связанная с добавлением суперсимметрии, сведет на нет существующий успех калибровочной симметрии в плане объяснения относительных значений сильных, электромагнитных и слабых констант связи. Мы втроем решили произвести вычисления с целью оценить сложность ситуации. Чтобы сориентироваться и сделать определенный расчет, мы начали с того, что проигнорировали всю проблему нарушения суперсимметрии. Это позволило нам использовать очень простые (но явно не реалистичные) модели.

Результат был потрясающим, по крайней мере для меня. Суперсимметричные версии моделей калибровочной симметрии, хотя они сильно отличались от оригиналов, дали почти тот же ответ относительно связей.

Это стало поворотным моментом. Мы отложили в сторону «не-ошибочные» сложные модели со спонтанным нарушением суперсимметрии и написали короткую статью, которая, будучи воспринятой буквально (с ненарушенной суперсимметрией), была бы неправильной. Однако она представляла результат, который был настолько прямолинейным и успешным, что идея объединения унификации и суперсимметрии показалась (возможно) правильной. Мы отложили проблему того, как нарушается суперсимметрия. И сегодня, несмотря на существование нескольких стоящих идей, общепринятого решения нет.

После нашей первоначальной работы более точные измерения связей позволили провести различие между прогнозами моделей с суперсимметрией и без нее. Модели с суперсимметрией работают намного лучше. Мы все с нетерпением ожидаем результатов работы Большого адронного коллайдера в ЦЕРН, Европейской лаборатории физики элементарных частиц, где в случае истинности этих идей должны появиться новые частицы суперсимметрии или, можно сказать, новые измерения суперпространства.

Этот небольшой эпизод, как мне кажется, примерно на 179° сдвинут по фазе относительно идеи Карла Поппера, заключающейся в том, что мы добиваемся прогресса, опровергая теории. Скорее, во многих случаях, включая некоторые из самых важных, мы внезапно решаем, что наши теории могут оказаться истинными благодаря пониманию необходимости стратегически игнорировать вопиющие проблемы. Аналогичный поворотный момент имел место, когда Дэвид Гросс и я решили предложить квантовую хромодинамику (КХД), основанную на асимптотической свободе, отложив проблему удержания кварков. Но это уже другая история...

Глоссарий

Адрон Физическая частица, основанная на кварках и глюонах (сами кварки и глюоны в расчет не берутся, поскольку они не могут существовать в свободном состоянии). Наблюдается два основных вида адронов: мезоны и барионы. Мезоны возникают, когда кварк и антикварк приходят в равновесие с Сеткой. Барионы появляются, когда в равновесие с Сеткой приходят три кварка. Обнаружено много десятков различных мезонов и барионов. Почти все они очень неустойчивы. Могут также существовать глюболы, образованные двумя или тремя глюонами. Имеют место некоторые разногласия относительно существования глюболов, поскольку на наблюдаемых частицах нет надписей!

Аксион Гипотетическая частица, предсказанная в классе теорий, исправляющих эстетические изъяны Центральной теории (нарушение пространственно-временной четности в слабых взаимодействиях). Предполагается, что аксионы очень слабо взаимодействуют с обычной материей и должны были образоваться в момент Большого взрыва с плотностью, примерно достаточной для создания темной материи. Поэтому аксионы являются хорошими кандидатами на звание основного компонента темной материи.

Амплитуда (квантовая) Квантовая механика позволяет предсказать вероятности различных событий, однако уравнения квантовой механики формулируются с использованием *амплитуд*, которые являются своего рода предвероятностью. Если точнее, то вероятность — это квадрат амплитуды. (Для специалистов: амплитуды, как правило, представляют собой комплексные числа, а вероятность равна квадрату их абсолютной величины.) Термин «амплитуда» используется для описания высот волн многих видов, например, океанических, звуковых или радиоволн. Квантово-механические амплитуды — это, по существу, высоты квантово-механических волновых функций. Дополнительную информацию и примеры вы можете найти в главе 9. См. также: Волновая функция.

Антиматерия Материя, с которой мы обычно имеем дело и из которой состоим, состоит из электронов, кварков, фотонов и глюонов. Вещество, состоящее из соответствующих античастиц: антиэлектронов (также известных как позитроны), антикварков, фотонов и глюонов, часто называется антиматерией (обратите внимание, что фотоны и глюоны являются своими собственными античастицами. Точнее, одни глюоны являются античастицами других; все восемь глюонов составляют полный набор частиц, замкнутый на себя). См. также: Античастица.

Античастица Античастица данной частицы имеет ту же массу и спин, что и эта частица, но противоположное значение электрического заряда и других сохраняющихся величин. Исторически первыми обнаруженными античастицами были антиэлектроны, также известные как позитроны. Они были теоретически предсказаны Дираком и впоследствии наблюдались Карлом Андерсоном в космических лучах. Важным следствием квантовой теории поля является то, что для каждого вида частиц существует соответствующая античастица. Фотон является

своей собственной античастицей; это возможно, поскольку фотоны электрически нейтральны. Пары «частица — античастица» могут иметь нулевые значения всех сохраняющихся квантовых чисел; таким образом, они могут быть получены из чистой энергии, а также могут возникать спонтанно в качестве квантовых флуктуаций (виртуальных пар).

Аромат В современной физике это малопонятное свойство кварков и лептонов; он имеет три возможных значения и не зависит от зарядов частиц. Например, существует три различных аромата *U*-кварков — *u* (верхний), *c* (очарованный) и *t* (истинный). Каждый из них имеет один и тот же электрический заряд 2*e*/3 и одну единицу цветного заряда (красного, белого или синего). Кроме того, существует три аромата *D*-кварков — *d* (нижний), *s* (странный) и *b* (прелестный), они также соответствуют трем цветам, а их электрический заряд равен –*e*/3. Существует также три аромата лептонов — *e* (электрон), μ (мюон), τ (тау-лептон), которые имеют электрический заряд –*e*, но не имеют никакого цветного заряда, и, наконец, есть три вида нейтрино, не имеющих ни электрического, ни цветного заряда. В каждой из этих групп частицы с различным ароматом участвуют в одинаковых взаимодействиях, описываемых Центральной теорией. Они различаются по массе, иногда очень значительно (например, *t*-кварк по меньшей мере в 35 000 раз тяжелее *u*-кварка). Слабые взаимодействия делают возможными преобразования одних ароматов в другие. Не существует хорошего теоретического объяснения того, почему массы таковы, каковы они есть.

Несмотря на то что *W*-бозоны меняют ароматы, было бы неверно думать, что аромат играет ту же роль в слабых взаимодействиях, что и цвет в сильном взаимодействии. *W*-бозоны реагируют не непосредственно на свойство аромата, а на другую пару зарядов, которые я назвал

слабыми цветными зарядами. *W*-бозоны меняют ароматы, так сказать, ради забавы; это не то, что ими руководит. Причины возникновения трех комплектов частиц с одинаковыми наборами зарядов и соответствующих каждому комплекту правил смены аромата, по которым играют *W*-бозоны, остаются глубокой тайной.

Асимптотическая свобода Концепция, согласно которой сильное взаимодействие становится слабее на малых расстояниях. Если конкретнее, то эффективные цветные заряды, которые регулируют мощность сильного взаимодействия, уменьшаются на малых расстояниях. Другими словами, величина данного изолированного цветного заряда увеличивается с увеличением расстояния. Физически это происходит потому, что источник заряда индуцирует облако виртуальных частиц, которое *антиэкранирует* его. Следствием асимптотической свободы является то, что излучение быстро движущегося цветного заряда, который движется в том же направлении (мягкое излучение), встречается часто, а излучение, которое изменяет общее направление потока, — редко. Мягкое излучение предоставляет кваркам партнеров, с которыми они могут соединиться, образуя адроны; однако общий поток подчиняется закономерности, заданной лежащими в основе кварками (а также антикварками и глюонами). Таким образом, мы «видим» кварки и глюоны не как отдельные частицы, а в виде струй, которые они индуцируют. В случае кварков мы можем иметь все и сразу. См. также: Заряд без заряда, Струя.

БАК Сокращенно от «Большой адронный коллайдер». БАК располагается в старом туннеле коллайдера БЭПК в ЦЕРНе. Он использует протоны вместо электронов и позитронов и достигает более высоких уровней энергии. Будет удивительно, если на ускорителе БАК не произойдут великие открытия. Как минимум мы должны выяснить, что делает Сетку оригинальным сверхпроводником.

Барион Один из двух основных классов сильно взаимодействующих частиц (адронов). Грубо говоря, барионы можно рассматривать как частицы, сформированные из трех кварков. Точнее, они являются результатом достижения равновесия между тремя кварками и Сеткой. Полная волновая функция для бариона содержит, помимо трех кварков, произвольное количество пар кварк — антикварк и глюонов. Протоны и нейтроны, строительные блоки атомных ядер, являются барионами. См. также: Адрон.

Бозон Квантовая теория, а точнее, квантовая теория поля придает новый смысл понятию о двух абсолютно одинаковых или неразличимых объектах. Если у вас есть, скажем, два фотона в состояниях A и B в данный момент и два фотона в состояниях A' и B' в более поздний момент, нельзя сказать, что имел место переход A → A', B → B' или A → B', B → A'. Необходимо учитывать обе возможности. В случае бозонов амплитуды вероятности складываются, в случае фермионов — вычитаются. Фотоны являются бозонами. Следствием будет то, что фотоны стремятся перейти в одно и то же состояние, так как амплитуды вероятности таких переходов удваиваются. Этот эффект используется в лазерах. Фотоны, глюоны, *W* и *Z* являются бозонами, как и мезоны и гипотетическая частица Хиггса. Мы часто говорим, что бозоны подчиняются статистике Бозе, или статистике Бозе — Эйнштейна, названной так в честь пионеров физики, которые разъяснили последствия этого поведения для систем, содержащих много одинаковых частиц.

Буст-повышение (нечасто упоминаемый, но живой термин) Преобразование, которое заставляет систему, включая все ее компоненты, двигаться с постоянной скоростью. Современный взгляд на специальную теорию относительности заключается в том, что она постулирует *буст-симметрию*. Таким образом, законы физики должны выглядеть одинаково после такого преобразования.

Вследствие этого, изучая физическое поведение исключительно в замкнутой изолированной системе, невозможно измерить, насколько быстро она движется.

БЭПК Сокращенное название Большого электрон-позитронного коллайдера. Этот ускоритель работал в европейской лаборатории ЦЕРН близ Женевы в 1990-х годах. Грубо говоря, он делал снимки пустого пространства с еще более высоким разрешением, чем коллайдер Стэнфордского центра линейного ускорителя. Для этого электроны и их античастицы (позитроны) ускорялись до огромных энергий, затем они аннигилировали, производя интенсивный выброс энергии в чрезвычайно малом объеме. БЭПК представлял собой машину для творческого разрушения. Эксперименты, проводимые на этом ускорителе, протестировали и доказали положения Центральной теории с необычайной количественной точностью. См. также: СЦЛУ.

Вершина См.: Узел.

Виртуальная частица Спонтанная флуктуация в квантовом поле. Реальные частицы представляют собой возбуждения в квантовых полях, которые относительно устойчивы и доступны для наблюдения. Виртуальные частицы мимолетны, они присутствуют в наших уравнениях, но не фиксируются экспериментальными детекторами. Поставляя в систему энергию, можно усилить спонтанные флуктуации так, чтобы они превысили пороговое значение, что фактически превратит (потенциальные) виртуальные частицы в реальные.

Волновая функция В квантовой теории состояние частицы не определяется положением или конкретным направлением спина; вместо этого первичное описание состояния включает его волновую функцию. Волновая функция определяет для каждого возможного положения и направления спина комплексное число — так называемую амплитуду

вероятности. Квадрат абсолютного значения амплитуды вероятности сообщает вероятность нахождения частицы в конкретном положении с конкретным направлением спина. Для систем, состоящих из большого количества частиц или полей, волновая функция аналогичным образом задает амплитуды для всех возможных физических характеристик, которые вы могли бы обнаружить после проведения измерения. Простой, но не упрощенный, пример работы волновых функций обсуждается в главе 9.

Гиперзаряд Средний электрический заряд нескольких частиц, связанных симметрией. В контексте единых теорий гиперзаряд является более фундаментальным по сравнению с электрическим зарядом; тем не менее это различие проявляется на более тонком уровне технических подробностей, чем я попытался изложить в большей части этой книги.

Глюон Любой из набора восьми частиц-посредников сильного взаимодействия. Глюоны обладают свойствами, подобными свойствам фотонов, однако реагируют на (и изменяют) цветные заряды, а не на электрический заряд. Уравнения для глюонов обладают колоссальной локальной симметрией, которая во многом определяет их форму. См. также: Хромодинамика, Локальная симметрия, Уравнения Янга — Миллса.

Диаграммы Фейнмана Диаграммы Фейнмана — это наглядные представления процессов, описываемых квантовой теорией поля. Они состоят из линий, соединенных в узлах (также называемых вершинами). Линии представляют собой свободное движение частиц через пространство-время; узлы представляют собой взаимодействия. В свете этой интерпретации диаграмма Фейнмана отображает возможный процесс в пространстве-времени — некоторые (реальные или виртуальные) частицы взаимодействуют, в результате чего может измениться их квантовое состояние. Существуют четкие правила распределения амплитуд

вероятности для процесса, изображенного на диаграмме Фейнмана. Согласно правилам квантовой теории квадрат абсолютного значения амплитуды соответствует вероятности процесса.

Замедление времени Эффект, который, если смотреть со стороны, проявляется как замедление течения времени в движущейся системе. Замедление времени является следствием специальной теории относительности.

Единая теория Различные компоненты Центральной теории основаны на общих принципах — квантовой механике, относительности и локальной симметрии, однако в рамках Центральной теории они остаются разделенными и отличными друг от друга. Существуют отдельные преобразования симметрии для цветных зарядов КХД, слабых цветных зарядов стандартной электрослабой теории и гиперзаряда. При этих преобразованиях кварки и лептоны делятся на шесть не связанных между собой классов (на самом деле на 18, учитывая наличие трех ароматов). Вся эта структура побуждает нас рассмотреть возможность большей, всеохватывающей симметрии. Изучив математические возможности, можно обнаружить, что многие вещи вписываются в нее довольно хорошо. Относительно небольшое расширение уравнений позволяет рассматривать все известные симметрии как части удовлетворяющего целого, а также сводить вместе разрозненные кварки и лептоны. Дополнительным преимуществом является то, что гравитация, которая казалась безнадежно слабее других фундаментальных сил, также находит свое место. Вероятно, для количественного подтверждения идей мы также должны включить суперсимметрию. Расширенные уравнения предсказывают существование многих новых частиц и явлений. Как говорилось в главах 17–21, эти теории представлены на суд присяжных и некоторые приговоры должны быть оглашены уже в скором будущем.

Закон сохранения Величина сохраняется, если ее значение для изолированной системы не меняется со временем. Заряд, энергия и импульс являются важными примерами сохраняющихся величин. Законы сохранения чрезвычайно важны, поскольку они обеспечивают устойчивые ориентиры среди непрекращающихся колебаний квантовой Сетки.

Заряд В электродинамике заряд представляет собой физическое свойство, на которое реагируют электрические и магнитные поля (магнитные поля реагируют только на движущиеся заряды). В ее квантовой версии, КЭД, мы можем просто сказать, что заряд — это то, о чем заботятся фотоны (они обеспечивают взаимодействие зарядов). Заряд может быть как положительным, так и отрицательным. Частицы с одинаковым электрическим зарядом (обе заряжены положительно или обе заряжены отрицательно) отталкиваются, в то время как частицы с противоположными зарядами притягиваются. Важным свойством заряда является то, что он сохраняется. Каждый вид фундаментальной частицы несет некоторый заряд, в том числе нулевой; заряд является стабильной характеристикой частиц соответствующего типа. Например, все электроны имеют одинаковое количество заряда, обычно обозначаемое $-e$ (сбивает с толку то, что некоторые авторы используют обозначение e без знака «минус»; насколько мне известно, соглашение по этому поводу не достигнуто). Протоны обладают зарядом e, противоположным заряду электронов. Полный заряд системы — это просто сумма зарядов всех ее элементов. Таким образом, атомы, которые содержат равное количество протонов и электронов, имеют в целом нулевой заряд. В теории сильного взаимодействия центральную роль играют три дополнительных вида зарядов, называемых цветными зарядами или просто цветами. Цветные заряды имеют схожие свойства с электрическим зарядом,

например, они сохраняются. В КХД взаимодействие цветных зарядов обеспечивают глюоны. См. также: Поле, Электродинамика, Цвет, Хромодинамика.

Заряд без заряда Концептуальное следствие асимптотической свободы. Эффективный цветной заряд данного источника уменьшается с увеличением расстояния. Ненулевое конечное значение заряда на ненулевом расстоянии соответствует нулевому в пределе нулевого расстояния. Таким образом, точечный источник создает заряд, не имея заряда. Это трюк, достойный Чеширского Кота.

Импульс Центральное понятие в физике. Первоначальной и наиболее очевидной формой импульса является механический импульс, связанный с движением частиц. В дорелятивистской механике импульс тела определялся путем умножения его массы на скорость. Ньютон назвал импульс «количеством движения», и он появляется в его втором законе: скорость изменения импульса тела равна действующей на него силе. В специальной теории относительности импульс тесно связан с энергией. При буст-преобразованиях энергия и импульс смешиваются друг с другом, подобно времени и пространству. Совокупный импульс изолированной системы сохраняется.

В современных физических теориях импульс выступает в качестве первичного понятия на том же основании, что и пространство, с которым он глубоко связан. Например, расстояние D, необходимое для прохождения пространственно-периодических электрических возмущений, связанных с фотоном, через один полный цикл, соотносится с импульсом фотона P как $PD = h$, где h — постоянная Планка. В рамках этих теорий сохранение импульса следует из симметрии уравнений относительно пространственной трансляции, или, выражаясь простым языком, из того факта, что законы везде одинаковы. Ср. с Энергией.

Калибровочная симметрия См.: Локальная симметрия.

Квантовое поле Заполняющий пространство объект, который подчиняется законам квантовой теории. Квантовые поля — это законные «дети» от «брака» между квантовой механикой и специальной теорией относительности. Квантовые поля отличаются от классических полей тем, что они проявляют спонтанное поведение, также известное под названием квантовых флуктуаций или виртуальных частиц, все время и повсеместно. Центральная теория, которая объединяет наше лучшее актуальное понимание фундаментальных процессов, формулируется в терминах квантовых полей. Частицы проявляются в качестве вторичных последствий; они представляют собой локализованные возмущения в первичных объектах, то есть в квантовых полях.

К общим последствиям квантовой теории поля, которые не вытекают из квантовой механики или классической теории поля в отдельности, относятся: существование типов частиц, являющихся одинаковыми повсюду и во все времена (например, все электроны имеют одинаковые свойства); существование квантовой статистики (см.: Бозон, Фермион); существование античастиц; неизбежная ассоциация частиц с силами (например, из существования электрических и магнитных сил можно вывести фотоны); вездесущность преобразования частиц (квантовые поля создают и уничтожают частицы); необходимость простоты и высокой симметрии для обеспечения согласованности законов взаимодействия; и асимптотическая свобода (см.: Асимптотическая свобода). Все эти следствия квантовой теории поля являются важными аспектами физической реальности, как мы ее воспринимаем.

Кварк Наряду с *глюонами* кварки являются участниками сильного взаимодействия (экспериментальный аспект) или *КХД* (теоретический аспект). Они представляют собой *фермионы* со *спином* 1/2. Существует три различных *аромата* *U*-кварков — *u* (верхний), *c* (очарованный) и *t* (истинный), каждый из них имеет один и тот же электрический заряд 2e/3 и одну единицу цветного заряда (красного, зеленого или синего); кроме того, существует три аромата *D*-кварков — *d* (нижний), *s* (странный) и *b* (прелестный), каждый из них также имеет электрический заряд –*e*/3 и цветной заряд одного из трех цветов. Процессы *слабого взаимодействия* могут трансформировать различные ароматы друг в друга. Таким образом (цветные) глюоны меняют цветной заряд кварка, но не его аромат, в то время как *W*-бозоны меняют аромат, но не цветной заряд. Кварки не наблюдаются непосредственно, но оставляют свою подпись в *струях* (экспериментальный аспект) и используются в качестве строительных блоков для построения наблюдаемых *адронов* (теоретический аспект). Все взаимодействия Центральной теории сохраняют разность общего количества кварков и антикварков. Это называется сохранением барионного числа и обеспечивает стабильность протонов. *Единые теории* обычно предполагают существование взаимодействий, которые превращают кварки в лептоны, а также могут приводить к распаду протонов. До сих пор такого распада не наблюдалось. См. также: Выделенные курсивом слова.

Конфайнмент Тот факт, что кварки никогда не наблюдаются изолированно. Если точнее, то для любого наблюдаемого состояния разность количества кварков и антикварков кратна трем. Конфайнмент — это математическое следствие хромодинамики, которое нелегко продемонстрировать.

Космологический член Логическое расширение уравнений общей теории относительности. На языке геометрии космологический член либо поощряет равномерное расширение пространства-времени, либо препятствует ему (в зависимости от его знака). Кроме того, космологический член можно интерпретировать как влияние постоянной плотности энергии (положительной или отрицательной) на метрическое поле. Эта плотность ρ сопровождается давлением p, связанным с ней посредством «хорошо темперированного уравнения» $\rho = -p/c^2$.

Кредитный счет Причудливое название унифицированной системы учета кварков и лептонов, которое в полной мере объясняет характер их сильных (цветных), слабых и электромагнитных зарядов. В качестве математической структуры используется спинорное представление группы $SO(10)$, а также конкретный выбор подгруппы $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Выбор подгруппы определяет, как Центральная теория встраивается в единую теорию. Если мы допускаем только преобразования установленной, меньшей центральной симметрии, единый кредитный счет распадается на шесть несвязанных фрагментов, а специфический характер электрических зарядов (или, что то же самое, гиперзарядов) остается без объяснения. См. также: Единая теория.

Кредо иезуитов «Блаженнее просить прощения, чем разрешения». Это глубокая истина.

КХД Сокращенное название квантовой хромодинамики. См. также: Хромодинамика.

КЭД Сокращенное название квантовой электродинамики. Это версия электродинамики, включающей квантовую теорию. Полям в ней свойственны спонтанные флуктуации (виртуальные фотоны), а их возмущения проявляются в виде дискретных, частицеподобных единиц (реальные фотоны). См. также: Электродинамика, Фотон, Квантовое поле.

Лептон e (электрон), μ (мюон), τ (тау-лептон), а также соответствующие им нейтрино. Эти частицы несут нулевой цветной заряд. Частицы e, μ и τ имеют один и тот же электрический заряд $-e$. (Да, я понимаю, что один и тот же символ используется для обозначения разных вещей. Если подумать, то это часто бывает с буквами.) Нейтрино несут нулевой электрический заряд. Все они участвуют в слабых взаимодействиях.

Существуют очень хорошие (но *не* совершенные) законы сохранения, согласно которым разность общего числа электронов и антиэлектронов, плюс разность общего числа электронных нейтрино и антинейтрино не меняется со временем (несмотря на то что отдельные числа могут изменяться), то же касается частиц μ и τ. Например, при распаде мюона конечным продуктом является электрон, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино. И начальное состояние, и конечное состояние имеют мюонное лептонное число 1 и электронное лептонное число 0. Эти «законы сохранения лептонного числа» нарушаются явлением нейтринных осцилляций. Небольшое нарушение закона сохранения лептонного числа было предсказано едиными теориями. Его наблюдение побуждает нас считать, что эти теории развиваются в правильном направлении. См. также: Нейтрино.

Локальная симметрия Симметрия, поддерживающая независимые преобразования в разных областях пространства-времени. Локальная симметрия — очень мощное требование, которому соответствуют далеко не все уравнения. И наоборот, принимая локальную симметрию, мы приходим к вполне конкретным уравнениям, вроде уравнений Максвелла и Янга — Миллса. Именно эти уравнения характеризуют Центральную теорию и мир. Локальная симметрия также называется калибровочной симметрией по интересным, но неясным историческим причинам. См. также: Симметрия, Уравнения Максвелла, Уравнения Янга — Миллса.

Масса Свойство частицы или системы, являющееся мерой ее инерции (то есть масса частицы показывает нам, насколько трудно изменить ее скорость). На протяжении веков ученые считали, что масса сохраняется, но теперь мы знаем, что это не так.

Масса без массы Концепция, реализованная в современной физике, согласно которой объекты с ненулевой массой могут создаваться из строительных блоков с нулевой массой.

Мезон Тип сильно взаимодействующей частицы, или адрона. См. также: Адрон.

Метрическое поле Поле, которое можно рассматривать как определяющее единицы для измерения времени и расстояния (во всех направлениях) в точке пространства-времени. Таким образом, само пространство содержит линейки и часы для его измерения. Обычные линейки и часы переводят эту основополагающую структуру в доступные формы. Материя влияет на метрическое поле, и *наоборот*. Их взаимодействие описывается общей теорией относительности и порождает наблюдаемую силу гравитации. См. также: Общая теория относительности.

Нейтрино Вид элементарной частицы, которая не имеет ни электрического, ни цветного заряда. Нейтрино представляют собой фермионы со спином 1/2. Существует три разных типа или аромата нейтрино, связанных с тремя ароматами заряженных лептонов (электронов — e, мюонов — μ и тау-лептонов — τ). В процессах слабого взаимодействия заряженные лептоны и их античастицы могут быть преобразованы в нейтрино и их античастицы, но всегда с сохранением лептонных чисел. (См.: Лептоны.) Солнце обильно испускает нейтрино, но их взаимодействия настолько слабы, что почти все они свободно проходят сквозь Солнце, не говоря уже о Земле, когда оказывается на их пути. Тем не менее в ходе смелых экспериментов

было обнаружена малая доля нейтрино, которые все-таки провзаимодействовали с детектором. Недавно было установлено, что различные типы нейтрино при их распространении на большие расстояния осциллируют, переходя из одной формы в другую (например, электронное нейтрино может превращаться в мюонное нейтрино). Такие колебания нарушают лептонные законы сохранения. Их существование и приблизительная величина согласуются с предусмотренными едиными теориями.

Нейтрон Легко опознаваемая комбинация кварков и глюонов, а также важный компонент обычной материи. Отдельные нейтроны являются неустойчивыми; они распадаются на протон, электрон и электронное антинейтрино со временем жизни около 15 минут. Тем не менее нейтроны, связанные в ядра, могут быть стабильными. Ср. с Протоном.

Общая теория относительности Теория гравитации Эйнштейна, основанная на идее искривленного пространства-времени, или, иначе говоря, на метрическом поле. В полевой формулировке общая теория относительности в широком смысле напоминает электромагнетизм. Но, в то время как электромагнетизм основан на отклике электрических и магнитных полей на заряды и токи, общая теория относительности основана на отклике метрического поля на энергию и импульс. См. также: Метрическое поле.

Обычное вещество Физическое вещество, изучаемое в биологии, химии, материаловедении и технике, а также в большей части астрофизики. Это вещество, из которого состоят люди, их домашние животные и машины. Обычное вещество состоит из *u*- и *d*-кварков, электронов, глюонов и фотонов. У нас есть точная и удивительно полная теория, описывающая обычное вещество: Центральная теория.

Планковские единицы измерения Единицы измерения длины, массы и времени, полученные на основе значений величин, которые присутствуют в физических законах, а не на основе эталонных объектов. Таким образом, не нужен ни стандартизированный эталон метра (или королевская конечность) для сравнения длин, ни вращающаяся Земля для отслеживания времени, ни эталон килограмма. Вместо этого планковские единицы измерения создаются путем возведения в степень и деления скорости света *(c)*, постоянной Планка *(h)* и постоянной Ньютона *(G)*, которая фигурирует в уравнениях для гравитации. Единицы Планка не используются в практической работе: планковские единицы длины и времени абсурдно малы; планковская единица массы абсурдно велика в масштабах атома, но очень мала в человеческих масштабах. Тем не менее планковские единицы имеют большую теоретическую важность. Они ставят задачу *вычисления* таких чисто числовых величин, как масса протонов в единицах Планка (поскольку вычислить массу стандартного килограмма невозможно, «проблема» вычисления массы протона в килограммах является плохо обусловленной).

Если экстраполировать существующие законы физики далеко за пределы тех масштабов, в которых они были протестированы, мы обнаружим, что квантовые флуктуации в метрическом поле во временных и пространственных масштабах, меньших планковской длины и времени, настолько важны по сравнению со своим средним значением, что практическое значение длины и времени теряет смысл. В этой книге приводятся важные указания на объединение различных сил природы, в частности на то, что их величины становятся равными, когда они измеряются в планковских единицах в масштабе планковской длины.

Поле Сущность, заполняющая пространство. Полевая концепция появилась в физике в XIX веке благодаря работе Фарадея и Максвелла, посвященной электричеству и магнетизму. Они обнаружили, что законы электричества и магнетизма можно сформулировать проще всего, если ввести идею о существовании невидимых электрических и магнитных полей, заполняющих все пространство. Сила, оказывающая влияние на электрический заряд в точке, дает меру силы электрического поля в этой точке; однако в концепции Фарадея — Максвелла поле существует вне зависимости от существования заряженной частицы, чувствительной к нему. Таким образом, поля живут своей собственной жизнью. Плодотворность этой концепции проявилась очень скоро, когда Максвелл обнаружил, что самовосстанавливающиеся возмущения в электрическом и магнитном полях можно интерпретировать как свет, не ссылаясь на какие-либо материальные заряды или токи.

В квантовой версии электродинамики электромагнитные поля рождают и уничтожают фотоны. В более общем смысле виды возбуждений, которые мы воспринимаем как частицы (электроны, кварки, глюоны и т. д.), создаются и уничтожаются различными полями (электронным полем и т. д.), которые являются первичными объектами. Это дает нам самое фундаментальное понимание того жизненно важного факта, что любые два электрона в любом месте Вселенной имеют одинаковые основные свойства. Оба они созданы одним и тем же полем!

Иногда физики или инженеры делают заявления вроде этого: «Я свел на нет электрическое и магнитное поля в своей специальной экранированной лаборатории». Не обманывайтесь! Это означает, что было занулено *среднее значение* этих полей; тем не менее электромагнитное поле как сущность все еще присутствует.

В частности, электромагнитное поле будет по-прежнему реагировать на токи зарядов внутри экранированной лаборатории, и оно все еще наполнено квантовыми флуктуациями, то есть виртуальными фотонами. Аналогичным образом средние значения электрических и магнитных полей в глубоком космосе равны нулю или почти равны, но сами поля простираются повсюду и поддерживают распространение световых лучей на сколь угодно большие расстояния. (Поле уничтожает фотон в одной точке, создает новый в следующей точке...) См. также: Квантовое поле.

Постоянная Планка Физическая константа, которая играет центральную роль в квантовой теории. Она встречается, например, в соотношении $E = h\nu$, связывающем энергию фотона с частотой света, который он представляет, или в соотношении $p = h / \lambda$, связывающем импульс фотона с длиной волны λ света.

Протон Очень устойчивая комбинация кварков и глюонов. Когда-то считалось, что протоны и нейтроны являются фундаментальными частицами; теперь мы понимаем, что они представляют собой сложные объекты. Можно построить полезную модель атомных ядер, используя идею о том, что они являются связанной системой, состоящей из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны имеют примерно одинаковую массу; нейтрон примерно на 0,2 % тяжелее. Протоны имеют электрический заряд e, равный по величине заряду электронов, но противоположный по знаку. Ядра атомов водорода являются одиночными протонами. Известно, что протоны живут по меньшей мере 10^{32} лет, что намного превышает время жизни Вселенной, однако единые теории предполагают, что их продолжительность жизни не может намного превышать существующий предел и для проверки этого предположения проводятся важные эксперименты.

РКТИ Сокращенное название Релятивистского коллайдера тяжелых ионов. РКТИ находится на Лонг-Айленде, в Брукхейвенской национальной лаборатории. Столкновения на РКТИ в очень небольшом объеме и в течение очень коротких периодов времени воспроизводят экстремальные условия, подобные тем, которые имели место в самые ранние моменты Большого Взрыва.

Сверхпроводник Некоторые вещества при охлаждении до очень низких температур переходят в фазу, в которой их отклик на электрическое и магнитное поля приобретает качественно новые особенности. Их электрическое сопротивление исчезает, и они в значительной степени вытесняют магнитные поля (эффект Мейсснера). Мы говорим, что они становятся сверхпроводниками. Математическое описание электромагнитного поведения сверхпроводников показывает, что внутри сверхпроводников фотоны приобретают ненулевую массу.

W- и *Z*-бозоны, несмотря на то что во многом напоминают фотоны, — имеют спин 1 и реагируют на (слабые цветные) заряды, — имеют ненулевую массу. На первый взгляд, эта ненулевая масса исключила бы привлекательную идею о том, что *W*- и *Z*-бозоны, подобно фотонам, подчиняются уравнениям с локальной симметрией. Сверхпроводимость указывает путь вперед. Постулируя то, что пространство является сверхпроводником не для электрических зарядов, а для зарядов, которые имеют значение для *W*- и *Z*-бозонов, мы придаем этим частицам ненулевую массу, сохраняя при этом локальную симметрию основополагающих уравнений. Это центральная идея современной электрослабой теории, и она, кажется, очень хорошо описывает Природу. Более умозрительные идеи постулируют дополнительный слой сверхпроводимости Сетки, чтобы придать очень большие массы частицам, которые опосредуют кварк-лептонные переходы.

Сетка Сущность, которую мы воспринимаем как пустое пространство. Наши глубочайшие физические теории показывают, что она очень высокоструктурирована; более того, она, по-видимому, является основной составляющей реальности. Сетке посвящена глава 8.

Сила 1. В физике Ньютона сила определяется как воздействие, которое при влиянии на тело вызывает его ускорение. Это определение было и остается полезным, поскольку во многих случаях силы оказываются простыми. Например, утверждение о том, что на изолированное тело не воздействуют никакие силы, эквивалентно первому закону движения Ньютона, в котором говорится, что изолированное тело движется с постоянной скоростью.
2. В современной фундаментальной физике, в частности в Центральной теории и ее унифицированных расширениях, старая концепция силы оказывается не очень полезной. До сих пор принято использовать такие выражения, как «сильная *сила*», «слабая *сила*» и т. д., однако между собой физики обычно используют более абстрактные выражения вроде «сильного *взаимодействия*». Как правило, в этой книге я использовал старую добрую англосаксонскую версию.

Сильное взаимодействие Одно из четырех фундаментальных взаимодействий. Сильное взаимодействие связывает кварки и глюоны в протоны, нейтроны и другие адроны, а также удерживает вместе протоны и нейтроны, образующие атомные ядра. Большая часть того, что наблюдается на ускорителях высоких энергий, представляет собой результат сильного взаимодействия.

Симметрия Симметрия имеет место, когда существуют различия, которые не имеют никакого значения. То есть объект или набор уравнений демонстрирует симметрию, когда вы можете сделать с ними то, что *могло бы* их изменить, но на самом деле этого не происходит. Таким образом, равносторонний треугольник имеет симметрию при

повороте на 120° вокруг своего центра, в то время как неравносторонний треугольник ее не имеет.

Скорость Темп изменения положения.

Слабая сила (или взаимодействие) Наряду с гравитацией, электромагнетизмом и сильным взаимодействием представляет собой одно из фундаментальных взаимодействий Природы. Эта сила также известна как слабое взаимодействие. Наиболее важным эффектом слабого взаимодействия является возможность преобразований между различными типами кварков и различными типами лептонов (но не преобразований кварков в лептоны или *наоборот*. Эти гипотетические кварк-лептонные преобразования возникают только в единых теориях). Слабое взаимодействие движет многими радиоактивными распадами и некоторыми критически важными реакциями горения звезд.

Сокращение Фицджеральда — Лоренца Эффект, при котором структуры в движущемся теле кажутся неподвижному наблюдателю сжатыми (укороченными) в направлении движения. Фицджеральд и Лоренц постулировали этот эффект, чтобы объяснить некоторые наблюдения в электродинамике движущихся тел. Эйнштейн показал, что сжатие Фицджеральда — Лоренца является логическим следствием буст-симметрии в форме, предложенной уравнениями Максвелла, то есть специальной теории относительности.

Спин Спин элементарной частицы является мерой ее углового момента. Угловой момент, в свою очередь, представляет собой сохраняющуюся величину, которая имеет почти такое же отношение к вращениям в пространстве, как (обычный) импульс к перемещениям в пространстве. См.: Импульс.

Спином элементарной частицы является либо целое число, либо целое число + $1/2 \times h / 2\pi$, где h — постоянная Планка. В классической механике угловой момент тела является мерой углового движения этого тела.

Величина спина является стабильной характеристикой для частиц каждого типа. Принято говорить, что лептоны и кварки имеют спин 1/2, поскольку их спин равен $1/2 \times h / 2\pi$. Протоны и нейтроны также имеют спин 1/2. Фотоны, глюоны, *W*- и *Z*-бозоны имеют спин 1. Пи-мезоны и гипотетическая частица Хиггса имеют спин 0. Поляризация света является физическим проявлением спина фотона.

Угловой момент изолированного тела сохраняется. Для изменения углового момента необходимо применить крутящий момент. Быстро вращающиеся гироскопы имеют большой угловой момент, и этот факт в значительной степени ответственен за их необычную реакцию на силы.

Спонтанное нарушение симметрии Когда устойчивые решения системы уравнений имеют меньшую симметрию, чем сами уравнения, мы говорим, что симметрия спонтанно нарушена. Это может произойти, когда энергетически выгодным становится формирование конденсата или фонового поля, как говорилось в главе 8 и приложении Б. Тогда устойчивое решение будет предполагать, что пространство заполнено веществом, свойства которого изменяются при некоторых (прежних) преобразованиях симметрии. Таким образом, такое преобразование больше не является отличием без различия — теперь оно действительно имеет значение! Связанная с ним симметрия была спонтанно нарушена.

Знакомым и простым примером спонтанного нарушения симметрии является соглашение о вождении автомобиля по одной стороне дороги. Не имеет значения, по какой стороне дороги движутся автомобили, пока все водители делают одно и то же. Если одни люди будут ездить по левой стороне, а другие по правой, то эта ситуация будет нестабильной. Разумеется, в разных странах, например в США и Великобритании, выбор стороны дороги может быть различным.

Стандартная модель Термин, призванный сделать так, чтобы одно из величайших интеллектуальных достижений человечества показалось скучным. Его иногда используют для обозначения электрослабой части Центральной теории, а иногда он подразумевает как электрослабую теорию, так и КХД.

Струя Четко различимая группа частиц, движущихся почти в одном направлении. Струи частиц часто наблюдаются как продукты высокоэнергетических столкновений на ускорителях. Асимптотическая свобода позволяет интерпретировать струи в качестве видимых проявлений кварков, антикварков и глюонов, скрытых на нижележащем уровне.

Суперсимметрия Новый тип симметрии. Суперсимметрия определяет преобразования между частицами, имеющими одни и те же заряды, но разные спины. В частности, она позволяет нам воспринимать бозоны и фермионы, несмотря на их радикально отличающиеся физические свойства, в качестве различных представлений одной и той же сущности. Суперсимметрия может быть понята как буст-симметрия в суперпространстве, расширение пространства-времени для учета дополнительных квантовых измерений.

Наши существующие уравнения Центральной теории не поддерживают суперсимметрию, но их можно расширить так, чтобы они ее поддерживали. Новые уравнения предсказывают существование многих новых частиц, ни одна из которых еще не наблюдалась. Необходимо постулировать некоторую форму сверхпроводимости Сетки, чтобы сделать тяжелыми многие из этих частиц. Хорошая новость заключается в том, что новые частицы в их виртуальной форме поддерживают успешное количественное объединение сил, как описано в главе 20. Одна из новых частиц могла бы стать хорошим кандидатом на звание источника темной материи. Ускоритель БАК должен быть достаточно мощным, чтобы произвести некоторые из новых частиц, если они существуют.

СЦЛУ Сокращенное название Стэнфордского центра линейного ускорителя, средства, которое сыграло ключевую роль в создании Центральной теории. Здесь Фридман, Кендалл, Тейлор и их соратники сфотографировали при высоком разрешении и короткой выдержке внутреннюю структуру протонов, что открыло путь к КХД. Ускоритель электронов длиной более трех километров, который они использовали, фактически представлял собой ультрастробоскопический наномикроскоп.

Темная материя Астрономические наблюдения показывают, что большая часть массы Вселенной, около 25 % от общей массы, распределена гораздо более равномерно по сравнению с обычным веществом и совершенно прозрачна. Галактики, состоящие из обычного вещества, окружены обширными ореолами темной материи. Вес этого ореола примерно в пять раз превышает вес видимой галактики. Сгустки темной материи могут также существовать сами по себе. Интересными кандидатами на звание источника темной материи являются вимпы (от англ. WIMP, Weakly Interacting Massive Particle — слабо взаимодействующие массивные частицы), связанные с суперсимметрией, или аксионы. См. также: Суперсимметрия, Аксион.

Темная энергия Астрономические наблюдения свидетельствуют, что большая часть массы Вселенной, около 70 % от ее общей массы, распределена равномерно и совершенно прозрачна. Другие независимые наблюдения указывают на ускоряющееся расширение Вселенной, которое мы можем приписать отрицательному давлению. Величины и относительный знак этих эффектов согласуются с хорошо темперированным уравнением. Таким образом, сделанные до сих пор наблюдения могут быть описаны с помощью космологического члена. Тем не менее логически возможно, что будущие наблюдения покажут: плотность или давление не являются постоянными или

не связаны хорошо темперированным уравнением. Термин «темная энергия» был введен для того, чтобы избежать предубеждения относительно этих вопросов.

Теория суперструн Совокупность идей для расширения законов физики. Эта теория вдохновила блестящих ученых на блестящую работу, результатом которой стали важные приложения к чистой математике. В настоящее время теория суперструн не предоставляет уравнений, описывающих конкретные природные явления. В частности, Центральная теория, которая точно описывает столь многое в физическом мире, не является приближением к теории суперструн.

Идеи теории суперструн не обязательно являются несовместимыми с Центральной теорией или с идеями объединения, изложенными в этой книге. Однако обсуждаемые здесь идеи исторически не возникли из теории суперструн, а также не были выведены из нее. Их происхождение, как я подробно объяснил, является отчасти эмпирическим, а отчасти математическим/эстетическим.

Узел Пространственно-временная точка, в которой взаимодействуют частицы (реальные или виртуальные). В диаграммах Фейнмана узлы — это места, где встречаются три или более линий. Теории взаимодействий частиц подчиняются правилам, описывающим возможные типы узлов, а также связанным с ними математическим факторам. В технической литературе узлы обычно называются *вершинами*. См. также: Диаграммы Фейнмана, Вершина.

Уравнение Дирака Предложенное Полем Дираком в 1928 году уравнение является модификацией уравнения Шрёдингера для квантово-механической волновой функции электронов. Оно предназначено для согласования квантовой механики с буст-симметрией (то есть со специальной теорией относительности). Уравнение Дирака, грубо говоря, в четыре раза больше уравнения Шрёдингера, точнее, это набор из четырех взаимосвязанных уравнений,

управляющих четырьмя волновыми функциями. Четыре компонента уравнения Дирака автоматически включают в себя спин (направленный вверх или вниз) как для частиц, так и для античастиц, что соответствует четырем компонентам. Несколько измененное уравнение Дирака также используется для описания кварков и нейтрино. В современной физике мы интерпретируем уравнение Дирака как уравнение для поля, которое рождает и уничтожает электроны (или, что то же самое, уничтожает и рождает позитроны), а не как уравнение для волновой функции отдельных частиц.

Уравнение Шредингера Приближенное уравнение для волновой функции электрона. Уравнение Шредингера не удовлетворяет буст-симметрии, то есть не согласуется со специальной теорией относительности. Однако это уравнение дает хорошее описание электронов, которые движутся не слишком быстро, и с ними легче работать, чем в случае с более точным уравнением Дирака. Уравнение Шредингера является основой для большинства практических работ в квантовой химии и физике твердого тела.

Уравнения Максвелла Система уравнений, определяющих поведение электрического и магнитного полей, включая их отклик на электрические заряды и токи. Максвелл вывел весь набор уравнений в 1864 году, систематизировав все известные в то время взаимосвязи электричества, магнетизма, заряда и тока; кроме того, он постулировал новый эффект, который сделал систему совместимой с сохранением заряда. Исходная формулировка Максвелла была несколько запутанной, поэтому основополагающая глубокая простота и симметрия уравнений не была очевидной. Позднее физики, в особенности Хевисайд, Герц и Лоренц, доработали уравнения Максвелла и предоставили нам ту их версию, которую мы знаем сегодня. Эти уравнения остались незатронутыми квантовой революцией, несмотря на развитие интерпретации электрических и магнитных полей. См. также: Поле.

Уравнения Янга — Миллса Обобщения уравнений Максвелла, которые поддерживают симметрию среди нескольких видов зарядов. Грубо говоря, уравнения Янга — Миллса — это уравнения Максвелла на стероидах. Современные теории сильного и электрослабого взаимодействия в значительной степени основаны на уравнениях Янга — Миллса для групп симметрии $SU(3)$ и $SU(2) \times U(1)$ соответственно.

Ускорение Темп изменения скорости. Таким образом, ускорение является скоростью изменения скорости изменения положения. Центральным открытием Ньютона в механике было то, что законы, регулирующие ускорение, часто являются простыми.

Фермион Квантовая теория, а точнее, квантовая теория поля, придающая новый смысл понятию о двух абсолютно одинаковых или неразличимых объектах. Если у вас есть, скажем, два электрона в состояниях A и B в данный момент и два электрона в состояниях A' и B' в более поздний момент, то нельзя сказать, что имел место переход A → A', B → B' или A → B', B → A'. Необходимо учитывать обе возможности. В случае бозонов амплитуды складываются, в случае фермионов — вычитаются. Электроны являются фермионами. Следствием этого выступает принцип запрета Паули: два электрона не могут занимать одно и то же состояние, поскольку в этом случае их амплитуды полностью зануляются. Принцип запрета Паули индуцирует эффективное отталкивание между электронами (квантово-статистическое отталкивание), которое в значительной степени отвечает за то, что разные электроны в атомах занимают разные состояния. В свою очередь, это в значительной степени обусловливает тот факт, что химия является обширным и сложным предметом. Не только электроны, но все лептоны и кварки, а также их античастицы являются фермионами. Это же касается протонов и нейтронов, что объясняет, почему *ядерная* химия представляет собой такой же обширный и сложный предмет. Мы часто говорим,

что фермионы подчиняются статистике Ферми, или статистике Ферми — Дирака, названной так в честь пионеров физики, которые разъяснили последствия этого поведения для систем, содержащих много одинаковых частиц.

Фотон Минимальное возбуждение электромагнитного поля. Фотон — это предельная единица света, иногда называемая квантом света. (Кстати, квантовый скачок — это очень *маленький* скачок.)

Хорошо темперированное уравнение $\rho = -p / c^2$. См. также: Космологический член, Темная энергия.

Хромодинамика Теория, описывающая поведение цветовых глюонных полей, включая их реакцию на цветные заряды и токи (потоки заряда). Это общепринятая теория сильного взаимодействия. Математически хромодинамика является обобщением электродинамики. Поскольку квантовая теория имеет большое значение во всех приложениях хромодинамики, ее часто называют квантовой хромодинамикой или, сокращенно, КХД. См. также: Сильное взаимодействие.

Цвет 1. Фундаментальное физическое свойство, аналогичное электрическому заряду, но отличное от него. Существует три вида цветного заряда, обычно называемые красным, зеленым и синим. Кварк несет единицу одного из этих цветных зарядов. Глюоны несут как положительную единицу, так и отрицательную единицу цветного заряда, возможно, разных цветов. 2. В повседневной жизни цвет, конечно же, означает нечто совершенно иное. А именно, цвет — это частота электромагнитного излучения, попадающая в узкую полосу, которая соответствует пиковому излучению Солнца. Это шутка. На самом деле повседневное использование понятия «цвет» является донаучным. Оно относится к реакции наших глаз и мозга на такое электромагнитное излучение. См. также: Заряд, Хромодинамика.

Центральная теория Наша рабочая теория сильных, электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействий. Она основана на квантовой механике, трех видах локальной симметрии — в частности, на группах преобразований $SU(3)$, $SU(2)$, $U(1)$ и общей теории относительности. Центральная теория предоставляет точные уравнения, управляющие всеми элементарными процессами, которые известны в настоящее время. Ее предсказания были проверены в ходе многих экспериментов и оказались точными. Центральная теория содержит эстетические изъяны, поэтому мы надеемся, что это не последнее слово Природы. (На самом деле она и не может им быть, поскольку не описывает темную материю.)

Частица Локализованное возмущение в Сетке.

Частица Хиггса Возбуждение в (пока гипотетическом)* поле, которое превращает пустое пространство в космический сверхпроводник для слабой силы.

Электродинамика Теория, описывающая поведение электрических и магнитных полей, включая их отклик на заряды и токи (потоки заряда). Ее также можно рассматривать как теорию фотонного поля. Свет во всех его формах, включая, например, радиоволны и рентгеновские лучи, теперь понимается как проявление электрических и магнитных полей. Основные уравнения электродинамики были открыты Максвеллом и усовершенствованы Лоренцом. См. также: Заряд, Уравнения Максвелла.

Электрон Фундаментальная составляющая материи. Электроны несут весь отрицательный электрический заряд в обычном веществе. Они занимают основную часть пространства в атомах вне их малых ядер. По сравнению с ядрами электроны являются очень легкими и подвижными, поэтому они играют основную роль в химии и, конечно, в электронике.

---

* Существование бозона Хиггса было подтверждено в 2012 году в ходе экспериментов на БАК. — *Примеч. науч. ред.*

Электро-слабая теория Современная теория, описывающая слабые и электромагнитные взаимодействия. Ее также иногда называют стандартной моделью. В электрослабой теории существует две главные идеи. Первая заключается в том, что уравнения управляются локальной симметрией; это приводит к уравнениям Максвелла и Янга — Миллса. Другая идея заключается в том, что пространство представляет собой необычный вид сверхпроводника, который, грубо говоря, замыкает некоторые взаимодействия, скрывая их эффекты. (Еще одна важная идея заключается в том, что взаимодействия являются хиральными. Она более техническая, и я не буду пытаться описать ее здесь. Наиболее впечатляющим следствием этой идеи является то, что слабые взаимодействия нарушают четность, то есть симметрию между левым и правым). Иногда говорят, что электрослабая теория объединяет КЭД и слабые взаимодействия, но было бы правильнее сказать, что она их смешивает. См. также: Слабое взаимодействие.

Энергия Центральное понятие в физике. Учитывая его важность, удивительно, каким невыразительным и малообещающим на первый взгляд кажется определение энергии. Действительно, только в середине XIX века появилась современная концепция энергии и ее сохранения. Первоначальной и наиболее очевидной формой энергии является кинетическая энергия, связанная с движением частиц (в дорелятивистской механике кинетическая энергия тела определялась как половина его массы, умноженная на квадрат его скорости; релятивистские формулы, включающие энергию покоя, обсуждаются в приложении А.) Кинетическая энергия тела обычно изменяется, когда на нее действуют силы, но для определенных видов сил (так называемых консервативных сил) можно определить функцию потенциальной энергии, зависящую только от положения тела, так что сумма кинетической

и потенциальной энергий будет постоянной. В более общем плане для систем тел и определенного класса сил сохраняется сумма всех их кинетических энергий и потенциальной энергии, зависящей от их положения. Первый закон термодинамики утверждает, что энергия сохраняется, хотя она может быть скрыта в качестве тепла, которое есть проявление очень мелкомасштабного, труднонаблюдаемого движения внутри тел. По сути, первый закон термодинамики утверждает, что фундаментальные силы природы всегда будут считаться консервативными. Это смелая гипотеза, выдвинутая задолго до того, как природа фундаментальных сил была понята и оправдана успехом термодинамики. См. также: Кредо иезуитов.

В современных физических теориях энергия предстает в качестве первичной концепции на том же основании, что и время, с которым она тесно связана. Например, время T, необходимое для того, чтобы осциллирующие электрические возмущения, связанные с фотоном, прошли один полный цикл, связано с энергией фотона E соотношением $ET = h$, где h — это постоянная Планка. В рамках этих теорий сохранение энергии следует из симметрии уравнений относительно трансляции времени, или, выражаясь простым языком, из того факта, что законы с течением времени не меняются.

Вы можете спросить: «Если фундаментальные законы физики обеспечивают сохранение энергии, почему люди должны принимать меры по ее экономии? В конце концов, законы физики должны быть самоисполняющимися!» Дело в том, что некоторые формы энергии более полезны, чем другие; в частности, случайное движение (тепло) не всегда доступно для выполнения полезной работы. Было бы лучше попросить людей, чтобы они минимизировали свое производство энтропии. См. также: Энтропия.

Энтропия Мера беспорядка. См. книгу по термодинамике или статью в «Википедии».

Эфир Заполняющее пространство вещество. До того, как физики приняли концепцию полей как фундаментальных компонентов реальности, они пытались создать механические модели электрических и магнитных полей. Они предположили, что электрические и магнитные поля описывают взаиморасположения элементарных частицеподобных объектов, вроде того как плотность и поля потока жидкостей описывают расположение и перегруппировку атомов. Эти модели были сложными и никогда не работали достаточно хорошо, в связи с чем понятие «эфир» получило плохую репутацию. Однако в современной физике заполняющая пространство среда является первичной реальностью. Свойства этой среды очень отличаются от свойств классического эфира, поэтому я дал ей новое название — Сетка.

Ядро Небольшая центральная часть атома, в которой сосредоточены весь положительный заряд и почти вся масса.

Примечания

Глава 1

Краткое и очень доступное, хотя отчасти устаревшее, введение в физику от гроссмейстера Ричарда Фейнмана называется «Характер физических законов» (издательства АСТ, Астрель, Neoclassic, 2011). «Фейнмановские лекции по физике» (три тома) (Ричард Фейнман, Роберт Лейтон и Мэтью Сэндс, издательство «Мир», 1967) были подготовлены для студентов старших курсов Калифорнийского технологического института, однако начальные части каждой книги и многие отдельные главы концептуальны, доступны для понимания и часто блестяще написаны.

Глава 2

С. 24. Классический анализ основ классической механики представлен в книге Эрнста Маха «Механика. Историко-критический очерк ее развития» (издательство «Регулярная и хаотическая динамика», 2000). Эйнштейн внимательно читал эту книгу в студенческие годы, и изложенная в ней критика ньютоновских концепций абсолютного пространства и времени помогла ему сформулировать концепцию относительности. Он писал: «Даже [Джеймс Клерк] Максвелл и [Генрих] Герц, которые в ретроспективе предстают теми, кто уничтожил веру в механику как предельную основу всего физического мышления, в своих рассуждениях всегда обращались к механике как к надежной основе физики. Именно Эрнст Мах в своей истории механики (Geschichte der Mechanik) пошатнул эту догматическую веру. Когда я был студентом, эта книга оказала на меня глубокое влияние в этом отношении. Я вижу

величие Маха в его неподкупном скептицизме и независимости». Взгляды Ньютона, выраженные его собственными словами, можно найти, в частности, в книге Newton's Philosophy of Nature (Hafner). О других исторических и философских перспективах можно узнать в книге Макса Джеммера «Понятие массы» (издательство «Прогресс», 1967).

Глава 3

Книга «Принцип относительности» (издательство «Книга по Требованию», 2012) — это незаменимый сборник классических работ по теории относительности. Он содержит работы Лоренца, Эйнштейна, Минковского и Вейля. В него включены две оригинальные статьи Эйнштейна, посвященные специальной теории относительности, а также его основополагающая работа по общей теории относительности. Первая половина первой работы Эйнштейна по специальной теории относительности практически не содержит уравнений и очень легко читается. Начальные части его первой презентации общей теории относительности также являются вдохновляющими и доступными для понимания. (Для студентов, изучающих физику: на мой взгляд, эта статья в целом остается лучшим введением в общую теорию относительности). Книга «Эволюция физики», написанная Эйнштейном и Леопольдом Инфельдом (издательство «Амфора», 2013), представляет собой очень доступное популярное изложение не только самой идеи относительности, но и ее интеллектуальных основ в электромагнетизме и основ физики полей. Два доступных современных введения в теорию относительности — это «Физика пространства-времени» (Эдвин Тейлор и Джон Уилер, издательство «Книга по Требованию», 2012) и It's About Time: Understanding Einstein's Relativity (David Mermin, Princeton).

Глава 4

С. 38. «95 % массы»: как нам предстоит убедиться, большая часть массы обычной материи легко вычисляется в рамках такой теории, первоэлементами которой считаются безмассовые глюоны, безмассовые *u*- и *d*-кварки — и все (такую теорию я называю КХД-лайт). В КХД-лайт действительно возникает «безмассовая масса». Однако это неполная теория природы. Она не учитывает многих явлений: электромагнетизма,

гравитации, электронов, минимальных масс *u*- и *d*-кварков, которыми те все-таки обладают. К счастью, можно оценить, каким образом эти феномены, исключенные из такой идеализированной картины, могут влиять на массу обычной материи. Проверить эти оценки можно с помощью расчетов, описанных в главе 9. Не буду томить: остаточные эффекты меняют общую картину менее чем на 5 %. (Для тех, кто в теме: основной эффект проистекает от *s*-кварка. Он очень тяжелый, чтобы считать его безмассовым, однако для точного интегрирования его масса слишком мала.)

Глава 5

Книга The Making of the Atomic Bomb (Richard Rhodes, Simon and Schuster) — это не только шедевр истории и литературы, но и еще и отличное введение в ядерную физику.

Глава 6

Яркий исторический отчет об идеях и экспериментах, приведших к КХД, можно найти в книге The Hunting of the Quark (Michael Riordan, Touchstone). Двумя хорошими, доступными для понимания отчетами о физике КХД и стандартной модели электрослабых взаимодействий являются The Theory of Almost Everything (Robert Oerter, Pi Press) и The New Cosmic Onion (Frank Close, Taylor and Francis). Уникальным и обязательным для прочтения является представление о КЭД, написанное Ричардом Фейнманом: «КЭД — странная теория света и вещества» (издательства «Полиграфиздат», Neoclassic, «Астрель», 2012).

С. 51. Книга 50 Years of Yang-Mills Theory (G.'t Hooft, World Scientific) представляет собой важное собрание статей ведущих специалистов по физике, основанной на уравнениях Янга — Миллса.

С. 52. «Без необходимости представлять образцы или делать какие-либо измерения» — это (на удивление, небольшое) преувеличение. Оно было бы верно, если бы все кварки имели либо нулевую, либо бесконечную массу. Конечные ненулевые значения их масс могут быть получены только в результате проведения измерений или из образцов. В природе *u*- и *d*-кварки имеют почти нулевую массу относительно массы протонов или нейтронов; в то же время кварки *c*, *b* и *t* являются настолько

тяжелыми, что играют очень незначительную роль в структуре протонов и нейтронов, даже в качестве виртуальных частиц. Странный кварк *s* является промежуточным, он играет определенную роль в структуре протонов и нейтронов, хотя и небольшую. Мы можем получить хорошую приближенную теорию протонов и нейтронов, сделав вид, будто *u*- и *d*-кварки имеют нулевую массу, в то время как другие имеют бесконечную массу и поэтому могут быть проигнорированы. Я называю эту приближенную теорию «облегченной КХД». В ней вам на самом деле не нужно производить измерения или предоставлять какие-либо образцы.

Эйнштейн подчеркивал идеал чисто концептуальных теорий, которые не требуют в качестве исходных данных результатов измерений или образцов, в своих «Автобиографических заметках»: «Я хотел бы сформулировать теорему, которая в настоящее время может основываться не более чем на вере в простоту, то есть понятность, природы: произвольных констант не существует... это означает, что устройство природы подразумевает возможность логичного установления таких строго определенных законов, в которых имеют место только рационально определенные константы (то есть не константы, численное значение которых может быть изменено без разрушения теории)». Облегченная КХД — это редкий пример мощной теории такого рода. (Для экспертов: другим примером является теория структурной химии, основанная на уравнении Шрёдингера с бесконечно тяжелыми ядрами.) Эта проблема тесно связана с вопросом фиксации параметров, который был поднят в главе 9, а также с философскими/методологическими дискуссиями в главах 12 и 19.

Поскольку кварки не являются изолированными частицами, понятие их массы требует особого рассмотрения. В случае коротких временных интервалов и расстояний кварки движутся так, будто они являются свободными (асимптотическая свобода). Мы можем вычислить некоторые последствия такого движения, которые, разумеется, зависят от того, какое значение мы припишем массе кварков. Затем при сравнении результатов вычислений с экспериментальными данными мы определяем значение массы. Это хорошо работает в случае более тяжелых кварков. Для легких кварков более практичным способом является вычисление вклада их массы в массу содержащих их адронов, как описано в главе 9.

Интуитивно под массой кварка мы понимаем массу *голого* кварка, свободного от окружающего его облака виртуальных частиц.

С. 64. Фраза «при строго идентичных условиях» предполагает отсутствие скрытых переменных, описывающих протоны, то есть то, что их степени свободы — это только положение и ориентация спина. Все приложения статистики Ферми к протонам основаны на данном предположении. Поэтому их успех неопровержимо это доказывает.

С. 67. Фраза «*никакой* внутренней структуры» ставит очень интересный и важный вопрос, который возникает не только для кварков, но и для протонов, ядер, атомов и молекул. Давайте обсудим его в применении к протонам. Как я уже упоминал в предыдущем примечании, существуют неопровержимые доказательства того, что состояние протона полностью определяется его положением и спином. Однако согласно нашей лучшей теории протоны представляют собой сложные системы кварков и глюонов или, если точнее (заглядывая вперед, в главы 7 и 8), сложные закономерности возмущений в Сетке. Как вся эта структура оказывается скрытой? Если внутри протона происходит все это дребезжание, почему различные протоны не могут предусматривать большое разнообразие различных состояний в зависимости от того, что именно происходит у них внутри?

В классической физике существовало бы множество возможных внутренних состояний или, если хотите, множество «скрытых переменных». Однако эти состояния устраняет квантовая цензура. В квантовой теории (опять же заглядывая вперед, в главу 9) мы узнаем, что протон или любая квантовая система реализует все возможные внутренние состояния сразу с разными амплитудами вероятности. Чтобы получить *квантовое* состояние с наименьшей энергией, протон объединяет множество *классических* состояний, каждое из которых имеет соответствующую амплитуду. Второе по предпочтительности квантовое состояние имеет совершенно иной набор амплитуд и гораздо более высокий уровень энергии. Вследствие этого вы должны *довольно сильно* потревожить протон, чтобы *хоть как-то* изменить его внутреннюю структуру. Небольшие возмущения не обеспечивают достаточного количества энергии для изменения амплитуды. Поэтому для малых возмущений всегда существует уникальный набор амплитуд — вариации подвергаются цензуре. Внутренняя структура, по сути, заморожена. Это похоже

на то, как снежный ком представляет собой жесткий шар, хотя и состоит из большого количества молекул, которые при более высоких температурах пребывали бы в жидком состоянии.

Еще более близкая с точки зрения математики аналогия касается физики музыкальных инструментов. Если вы правильно играете на флейте, она будет издавать определенный желаемый тон (конечно, в зависимости от расстановки пальцев). Только если вы дуете слишком сильно или беспорядочно, это приведет к возникновению обертонов и скрипов. Желаемый тон соответствует определенной, довольно сложной структуре вибрации воздуха в флейте. Обертон соответствует совершенно другой структуре. В квантовой теории мы имеем вибрирующие волновые функции вместо вибрирующего воздуха, однако эти концепции и математика очень схожи. Действительно, когда была открыта «новая» квантовая теория, использующая волновые функции, физики вернулись к своим текстам по акустике, чтобы лучше разобраться с математикой.

Именно из-за квантовой цензуры, казалось бы, радикальные представления о глубинной структуре вещества могут оказаться малополезными. Например, широко распространено предположение о том, что кварки являются струнами. Тем не менее у нас есть четкая теория — КХД, точно описывающая многие эксперименты (на сегодняшний день все), которая не учитывает такую вероятность. Как это возможно?

Если кварк является струной, то квантово-механическая волновая функция для кварка будет поддерживать конфигурации основополагающей струны с разными размерами и формами, взвешенными по их амплитудам. С течением времени эти различные конфигурации эволюционируют друг в друга, однако общее распределение остается прежним.

Пока распределение амплитуд конфигураций струн остается неизменным, оно является инертным и незаметным. И изменение этого распределения может потребовать много энергии. Внутренние степени свободы струны невидимы при проведении экспериментов, которые не достигают этого критического уровня энергии. Для практических целей они с тем же успехом могли бы и вовсе не существовать. Никому точно не известно значение критической энергии для колебаний кварковой струны, однако она должна быть значительно больше того уровня, который достижим для какого-либо из существующих ускорителей.

С. 81. Более подробное описание различия между мягким и жестким излучением может быть основано на связи между импульсом глюона и длиной волны его волновой функции. Низкое значение импульса соответствует большей длине волны. Длинные волны не разрешают мелкую структуру кваркового облака и поэтому реагируют на него в целом с усилением его цветового заряда в результате антиэкранирования. Короткие волны разрешают внутреннюю структуру. Горбы и впадины этих волн нейтрализуют взаимодействие со всем облаком, оставляя вклад теперь уже разрешенного затравочного заряда.

Глава 7

С. 83. Классическим введением в тему симметрии, написанным великим пионером в математике и высокообразованным человеком Германом Вейлем, является книга «Симметрия» (Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1968). Юджин Вигнер ввел теорию групп в современную физику, а его сборник эссе Symmetries and Reflections (Ox Box) интересен с различных точек зрения.

С. 101. Будничные особенности квантовой теории поля — не для слабонервных. Если вы хотите углубиться в предмет, я бы рекомендовал начать с упомянутой ранее книги Фейнмана «КЭД» и моей обзорной статьи «Квантовая теория поля», написанной к 100-летию Американского физического общества, напечатанной в книге More Things in Heaven and Earth (ed. Bederson, Springer) и размещенной на сайте itsandbits.com. В течение примерно четырех лет основным учебником была книга An Introduction to Quantum Field Theory (Michael Peskin and Daniel Schroeder, Addison-Wesley); отличным новым кандидатом на это звание является книга Quantum Field Theory (Mark Srednicki, Cambridge). В книге Энтони Зи «Квантовая теория поля в двух словах» (издательство «Регулярная и хаотическая динамика», 2009) в свежем ключе изложены многие необычные аспекты данного предмета. Наконец, трилогия Стивена Вайнберга «Квантовая теория поля» (издательство «Физматлит», 2015) является великим произведением великого мастера, однако, исключая историческое введение в первом томе, непрофессионалам оно, вероятно, покажется очень трудным для восприятия.

Глава 8

Биография Эйнштейна. Существует множество биографий Эйнштейна. Два лучших произведения, подчеркивающих его научные воззрения, — это его собственные автобиографические заметки в книге Albert Einstein, Philosopher-Scientist (edited by P. Schilpp, Library of Living Philosophers) и Subtle Is the Lord, Abraham Pais (Oxford). Абрахам Пайс был по-своему выдающимся физиком.

Биография Фейнмана. Фейнман не написал систематической автобиографии, однако его личность хорошо проявлена в его сборниках рассказов «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман!» (издательство АСТ, 2015) и «Не все ли равно, что думают другие?» (издательства АСТ, Neoclassic, 2014). Книга Genius (James Gleick, Pantheon) представляет собой хорошо написанное и глубокое исследование яркой жизни Фейнмана.

С. 108. «противоречия». Противоречия с чем? С сохранением заряда. Максвелл применил известные уравнения к «мыслительной цепи», включая то, что сегодня мы назвали бы конденсатором, и обнаружил, что они требуют, чтобы электрический заряд возникал из ниоткуда. Поскольку экспериментальные данные, казалось, очень сильно свидетельствовали в пользу сохранения заряда при всех обстоятельствах, Максвелл соответствующим образом модифицировал уравнения.

С. 118. Цитата Эйнштейна «о поисках истины» взята из речи, с которой он выступил в университете Глазго в 1933 году. Цитата «об одновременности» взята из его «Автобиографических заметок».

С. 119. В этом обсуждении, касающемся необходимости полей, я говорю об универсальной ценности момента «сейчас», о поиске решения для полей в будущем, исходя из состояния полей в настоящее время и т. д. Как это может работать, учитывая относительность одновременности?

Технический ответ: в ускоренной системе отсчета горизонтальный срез «сейчас» будет изменен на наклонный срез. Но поскольку уравнения принимают одинаковую форму, все равно можно будет вычислить значение полей вне среза, используя их значения на срезе. (Иными словами, вы должны знать как значение полей, так и их производные по времени.) Короче говоря, разные моменты «сейчас», тот же аргумент.

Тем не менее здесь присутствует значительная сложность, которая мешает заключению «брака» между квантовой теорией и теорией относительности. В уравнениях квантовой теории и в их интерпретации время очень отличается от пространства. Однако в уравнениях теории относительности время и пространство смешиваются. Поэтому, когда мы занимаемся квантовой механикой, мы отмечаем очень сильное различие между временем и пространством, но мы должны показать, если мы верим в относительность, что это различие в конечном итоге не имеет значения. По сути, именно поэтому так трудно создать квантовые теории, которые согласовывались бы со специальной теорией относительности. Единственный известный нам способ это сделать подразумевает использование сложного формализма квантовой теории поля (или, возможно, еще более сложного — и по-прежнему неполного — формализма теории суперструн). Обратная сторона этой сложности заключается в том, что это приводит нас к очень жесткой, специфической схеме, а именно к квантовой (для специалистов: локальной) теории поля. К счастью, это оказывается той схемой, которую Природа использует в нашей Центральной физической теории. Возвращаясь к брачной метафоре: если вы очень разборчивы в отношении того, что вы готовы принять в партнере, то, если вы вообще кого-то найдете, этот кто-то, скорее всего, окажется подходящим человеком!

С. 131. В упомянутых ранее книгах Клоуза и Олмерта содержится обстоятельное описание слабого взаимодействия.

С. 135. В книге Lectures on Classical Differential Geometry (Dirk Struik, Dover) хорошо освещена математическая картография. Книгой, в которой подчеркивается геометрический подход к общей теории относительности, является «Гравитация», написанная Чарльзом Мизнером, Кипом Торном и Джоном Уилером (издательство «Мир», 1977). Классическим произведением, освещающим полевой подход, является книга Gravitation and Cosmology (Steven Weinberg, Wiley). Я должен подчеркнуть, что между этими подходами нет противоречия, и хорошие физики учитывают оба.

С. 140. Книга Брайана Грина «Элегантная Вселенная» (издательство «Либроком», 2017) представляет собой популярное и восторженное представление о теории струн.

С. 140. «многообещающая возможность»: последние разработки в космологии все чаще указывают на то, что в начале своей истории Вселенная пережила период очень быстрого расширения, известного как *инфляция*. Книга The Inflationary Universe (Alan Guth, Perseus) представляет собой превосходное популярное изложение лежащей в основе этой идеи теории ее отцом-основателем. Согласно этой теории к числу объектов, подвергшихся инфляции, относятся и квантовые флуктуации в метрическом поле. Эти флуктуации, увеличенные до космологических масштабов, могут быть обнаружены сегодня. Планируются смелые эксперименты по поиску этого эффекта.

Точная причина инфляции (если она действительно имела место) неизвестна. Однако вероятный виновник является следствием объединения двух идей, обсуждаемых в этой главе.

- Мы говорили о том, что пустое пространство заполнено различными материальными конденсатами. При чрезвычайно высоких температурах эти конденсаты могут «плавиться» или иным образом изменять свое состояние. Мы говорим о фазовом переходе, концептуально похожем на знакомые фазовые переходы: (твердое тело) лед → (жидкость) вода → (газ) пар; однако здесь мы говорим о космических фазовых переходах. Поскольку само пространство изменяет свои свойства, меняются законы физики.
- Одной из вещей, которая изменяется при таких космических фазовых переходах, является энергия конденсата. Как мы обсудим далее, это изменение проявляется в виде вклада в темную энергию. Таким образом, очень правдоподобным кажется то, что очень ранняя Вселенная могла характеризоваться гораздо более высокой плотностью темной энергии по сравнению с тем, что мы видим сегодня. Существующая в настоящее время темная энергия способствует ускорению расширения Вселенной, но лишь слегка. Значительно большая плотность на ранней стадии вызвала бы гораздо более сильное ускорение.

Именно этим может объясняться инфляция.

С. 149. Книга The Extravagant Universe (Mark Kirshner, Princeton) — это отчет о наблюдениях одного из ведущих астрономов.

С. 151. «Популярное предположение»: эти идеи ясно объясняются и отстаиваются в книге Леонарда Сасскинда «Космический ландшафт» (издательство «Питер», 2016).

Глава 9

С. 155. «Классический компьютер должен»: эти шаги описывают то, что связано с прямым решением уравнений. Существуют хитроумные трюки, которые в некоторых случаях позволяют обойти какие-то из них. Они имеют такие названия, как евклидова теория поля, функция Грина Монте-Карло, стохастическая эволюция и т. д. Это сугубо технический вопрос, обсуждение которого выходит за рамки данной книги. Прогресс в решении уравнений квантовой механики мог бы изменить мир, позволив заменить эксперименты в химии и материаловедении вычислениями. Прогресс в вычислительной аэродинамике в значительной степени достиг этой цели в плане проектирования самолетов, так что новые проекты можно опробовать с помощью вычислений, минуя этапы прототипирования и тестирования в аэродинамической трубе.

С. 155. «Квантовые компьютеры»: два направления спина — вверх или вниз — можно интерпретировать как единицы и нули, поэтому их можно воспринимать в качестве битов. Однако, как будет подробно рассказано далее, квантовое состояние набора спинов может описывать многие конфигурации спинов одновременно. Таким образом, можно представить себе одновременную работу с множеством различных конфигураций битов. Это своего рода параллельная обработка, обеспечиваемая законами физики. Кажется, что Природа очень хорошо с этим справляется, поскольку она решает уравнения квантовой механики очень быстро и без особых видимых усилий.

Мы не настолько хорошо с этим справляемся, по крайней мере пока. Проблема состоит в том, что различные спиновые конфигурации по-разному взаимодействуют с внешним миром, и это нарушает процесс упорядоченной параллельной обработки, который мы хотели бы осуществить. Сложность при создании квантового компьютера заключается в нахождении способов предотвращения взаимодействия спинов с внешним миром, или внесения поправок с учетом этих взаимодействий, или изобретения менее чувствительных по сравнению со спинами объектов, которые подчинялись бы аналогичным уравнениям. В этой области активно ведутся исследования; решения, которое являлось бы очевидным победителем, пока не существует.

С. 160. «ЭПР-парадокс»: Более точные количественные формы ЭПР-парадокса, включающие такие понятия, как неравенство Белла и состояния Гринбергера — Хорна — Цайлингера, описаны в книгах, посвященных основам квантовой механики. Хорошее ясное изложение можно найти в книге Consistent Quantum Theory (Robert Griffiths, Cambridge). Существует множество книг, посвященных различным интерпретациям квантовой теории, тестированию ее элементарных составляющих и т. д. По моему мнению, если вы видите небоскреб, простоявший десятилетия и выдержавший даже сильную бомбардировку, вы должны заподозрить, что его фундамент чрезвычайно прочный, даже если вы его не видите. С другой стороны, идея сохранения массы когда-то казалась очень правдоподобной...

С. 160. «32-мерная»: это примечание предназначено исключительно для экспертов. Ненормализованные амплитуды описывают пространство, имеющее 32 *комплексных* измерения. Это соответствует 64 реальным измерениям. При нормализации состояния мы теряем два из них. Таким образом, на самом деле мы имеем дело с 62-мерным пространством.

С. 162. «Является бесконечным»: квантовый континуум настолько сложно сконструировать, что мы начинаем думать, как от него избавиться. Эдвард Фредкин и Стивен Вольфрам — выдающиеся сторонники этой точки зрения. Грубые попытки, разумеется, не работают.

Не вдаваясь в дебаты, я просто скажу, не боясь противоречия, что из существенно отличающихся конкурирующих идей не возникло ничего даже отдаленно приближающегося к полноте и точности Центральной теории. С другой стороны, нас смущает наличие ограничивающих процессов (и, следовательно, в принципе бесконечно длительных вычислений) в самой базовой формулировке физических законов. Но так ли это на самом деле? Для меня не является очевидным то, что истинные бесконечности возникают, только если мы просим теорию ответить на вопросы, которые можем задать и экспериментально. При проведении экспериментов нам доступно ограниченное количество времени и энергии и мы можем производить измерения с ограниченной степенью точности. А *приблизительные* вычисления не требуют достижения предела!

У меня голова кружится от этого примечания, поэтому я лучше завершу его прямо сейчас.

С. 165. «Ошибки также будут небольшими»: я хотел бы посвятить этот короткий и необязательный к прочтению абзац очень важному, хотя и слегка техническому концептуальному моменту. Вас может беспокоить то, что упомянутые ошибки способны заменить непрерывное пространство-время дискретной решеткой. При решении многих научных задач, например при предсказании погоды или моделировании климата, это создает огромную проблему. Однако здесь благодаря асимптотической свободе не все так плохо. Поскольку кварки и глюоны слабо взаимодействуют на малых расстояниях, вы можете вычислить аналитически, то есть с помощью ручки и бумаги, эффект от замены реальной динамики на локальные средние, соответствующие узлам решетки. После этого вы можете внести соответствующие поправки.

С. 169. «Приспосабливаем, а не прогнозируем»: масса m_π пиона наиболее чувствительна к m_{light}; масса m_K K-мезона K наиболее чувствительна к m_s, а относительная масса ΔM_{1P} состояния боттомония $1P$ наиболее чувствительна к силе связи, поэтому мы используем измеренные значения m_π, m_K и ΔM_1P для фиксации этих параметров.

С. 171. На самом деле популярного описания численной квантовой теории поля, также известной как решеточная калибровочная теория, не существует и, вероятно, никогда не будет существовать. Хотя некоторые из ее результатов можно описать довольно просто, как я уже делал это здесь, технические подробности — это материал для выпускников.

Глава 10

С. 175. «Зловещую грозовую тучу»: для минимизации энергии возмущение на самом деле самоорганизуется в трубку, а энергия пропорциональна длине этой трубки (как и ее масса, согласно второму закону Эйнштейна). Трубка прослеживает влияние цветного заряда кварка, поэтому она не может закончиться (кроме как на антикварке) и ее выраженная в энергии стоимость бесконечна.

Глава 11

Книга The Physics Of Music And Musical Instruments (David Lapp) по адресу http://kellerphysics.com/acoustics/Lapp.pdf представляет собой лаконичное, большей частью нематематическое введение в физику звука и музыкальных инструментов со множеством изображений. Двумя шедеврами являются On the Sensations of Tone (Hermann Helmholtz, Dover) и два тома The Theory of Sound (Lord Rayleigh, Dover). Только профессионалы захотели бы прочитать эти тома от корки до корки, а некоторые части книги Гельмгольца являются устаревшими, однако простое их пролистывание может послужить источником вдохновения. Они заставят вас гордиться тем, что вы человек.

Глава 12

С. 183. «И говорит»: разумеется, на самом деле это говорит сценарист!

С. 184. Эта шутка взята из книги Quirkology (Richard Wiseman, Macmillan).

С. 185. На странице http://www.sonnetsoftware.com/bio/maxbio.pdf размещена книга The Life of James Clerk Maxwell, with a selection from his correspondence and occasional writings and a sketch of his contributions to science (Lewis Campbell, William Garnett). Это отличный ресурс, на котором можно найти все, что касается Максвелла. В дополнение к отличной биографии там можно найти превосходный отчет о его научных воззрениях, а также множество его рисунков, писем и даже несколько сонетов.

С. 186. «Избыточную или несущественную информацию»: помимо простой цели сохранения краткости сообщения, хорошая система сжатия данных включает несколько дополнительных смыслов. Мы можем допускать некоторые ошибки, если они не слишком сильно портят результат. Формат JPEG, например, подразумевает разбиение непрерывного изображения на отдельные пикселы, при котором снижается точность передачи цветов, однако обычно получаются хорошие «репродукции». Если бы приоритетом была точность, а канал был бы шумным, мы могли бы обеспечить некоторую избыточность в передаваемом сообщении

даже ценой его удлинения. Такой подход применяется к отчетам об измерениях, получаемых с астрономических или GPS-спутников. Подобным образом при создании математических моделей, например, в машиностроении или экономике люди могут быть очень заинтересованы в использовании уравнений, которые допускают ошибки в обработке данных, а также вмещают как можно большее количество эмпирической информации. Тем не менее теоретическая физика делает значительный акцент на сжатии и точности.

С. 189. «Существование новой планеты». История открытия планеты Нептун сложна и, насколько я понимаю, несколько противоречива. Алексис Бувар еще в 1821 году предположил, что некая «темная материя» может оказывать влияние на Уран (приношу свои извинения Барту Симпсону). Однако без математической теории он не мог предположить, где ее следует искать. В 1843 году Джон Куч Адамс произвел расчеты, согласно которым проблемы с орбитой Урана могли объясняться существованием новой планеты, и предоставил координаты, однако он не опубликовал свою работу и не убедил никого из наблюдателей проверить его предположения.

С. 189. «Оптимального сжатия данных»: концептуальные основы современных методов сжатия данных можно найти в книге Information Theory, Inference, and Learning Algorithms (David MacKay, Cambridge). О связях с построением теорий и с работой Геделя и Тьюринга можно почитать в книге An Introduction to Kolmogorov Complexity and Its Applications (Ming Li, Paul Vitányi, Springer).

Глава 13

С. 194. «А именно, обратно пропорционально квадрату расстояния»: это верно на макроскопических расстояниях. На сверхкоротких расстояниях в игру вступают два новых эффекта и работают другие законы силы. Мы уже обсуждали, как флуктуации Сетки могут модифицировать силу в результате ее экранирования (уменьшения) или антиэкранирования (увеличения) виртуальными частицами. Другой эффект, который мы обсуждали, заключается в том, что в квантовой механике

зондирование малых расстояний обязательно связано с большими значениями импульса и энергии. Это влияет на силу гравитации, поскольку гравитация непосредственно реагирует на энергию. Такие модификации законов взаимодействия имеют очень большое значение в идеях об их объединении, которые обсуждаются в третьей части данной книги.

Глава 14

С. 197. «Тем же путем»: так же как через данную точку можно провести бесконечное число прямых, через данную точку пространства-времени проходит бесконечное число «прямых» путей с разными углами наклона. Они соответствуют траекториям частиц с разными начальными скоростями. Таким образом, точное утверждение об универсальности подразумевает то, что тела, начавшие движение из одной и той же позиции *и с одинаковой скоростью*, будут двигаться одинаково под действием силы тяжести.

Глава 16

С. 204. «Троим счастливчикам»: в 2004 году Дэвид Гросс, Дэвид Политцер и я разделили Нобелевскую премию «за открытие асимптотической свободы в теории сильного взаимодействия».

С. 204. «Итальянскую натуру»: это от моей мамы. Мой отец поляк.

С. 205. «Не является даже неправильным»: история о Фейнмане и Паули — хорошо известный среди физиков случай. Я не знаю, произошло ли это на самом деле, и, честно говоря, не хочу знать. Лучше оставить эту историю как есть.

С. 211. «Затравочная постоянная сильного взаимодействия»: выбор взаимодействия как меры силы связи является несколько произвольным. Возможно, более фундаментальной мерой будет число, на которое умножаются узлы в диаграммах Фейнмана, когда в процессе участвуют частицы с планковской энергией и импульсом. Это число еще ближе к масштабу объединения и составляет около 1/2. Любая разумная мера даст результат, близкий к масштабу объединения безусловно, *намного* более близкий по сравнению с 10^{-40}!

Глава 17

Идеи объединения Центральной теории путем расширения ее локальной симметрии были впервые предложены Джогешем Пати и Абдусом Саламом, а также Говардом Георги и Шелдоном Глэшоу. Симметрия $SO(10)$ и классификация, подчеркнутые в этой главе, были впервые предложены Георги. Хорошее их изложение можно найти в книгах Grand Unified Theories (Graham Ross, Westview) и Unification and Supersymmetry (Rabindra Mohapatra, Springer).

С. 218. «Возможно, навсегда»: я не хочу утверждать, что Центральная теория никогда не будет превзойдена. Надеюсь, что будет, и я попытаюсь описать, почему и как. Но так же, как ньютоновская теория механики и гравитации остается тем описанием, которое мы используем в большинстве случаев, Центральная теория имеет такой большой список успешных применений, что я не могу себе представить, почему люди захотели бы от нее отказаться. Более того, я считаю, что Центральная теория предоставляет исчерпывающую основу для биологии, химии и звездной астрофизики, которая никогда не потребует модификации. («Никогда» — это слишком долго. Скажем, в ближайшие несколько миллиардов лет.) Упомянутая в предыдущем примечании квантовая цензура защищает эти предметы от той дикости, которая происходит на сверхкоротких расстояниях и сверхвысоких уровнях энергии.

С. 219. В книге Weak Interactions of Leptons and Quarks (Eugene Commins, Philip Bucksbaum, Cambridge) содержится исчерпывающее обсуждение астрофизических приложений. Книга Neutrino Astrophysics (John Bahcall, Cambridge) представляет собой авторитетное изложение темы от великого мастера в данной области.

С. 219. «Звезды живут»: к ядерным превращениям, из которых звезды черпают свою энергию, также относятся реакции синтеза, не требующие превращения протонов в нейтроны, например процесс, при котором три альфа-частицы (каждая из которых состоит из двух протонов и двух нейтронов) объединяются в углеродное ядро (шесть протонов и шесть нейтронов). Такие реакции не связаны со слабым взаимодействием, а подразумевают только сильное и электромагнитное взаимодействия. Они особенно важны на более поздних этапах эволюции звезд.

С. 224. «Леворукие» и «праворукие» частицы: на самом деле следовало бы сказать «леворукие и праворукие поля».

Частица с ненулевой массой движется со скоростью, меньшей скорости света, и это порождает следующую проблему: вы можете представить себе такое быстрое ускорение, при котором можно обогнать эту частицу. Движущемуся с ускорением наблюдателю покажется, что частица движется назад, то есть в направлении, противоположном направлению, в котором она движется для неподвижного наблюдателя. Поскольку направление вращения выглядит по-прежнему, частица, которая кажется «праворукой» для неподвижного наблюдателя, покажется «леворукой» движущемуся наблюдателю. Однако согласно теории относительности оба наблюдателя должны наблюдать одни и те же законы. Вывод: законы не могут напрямую зависеть от «рукости»* частиц.

Правильная формулировка является более тонкой. У нас есть квантовые поля, которые создают «леворукие» частицы, и отдельные квантовые поля, создающие «праворукие» частицы. Уравнения для этих основополагающих полей различны. Однако, как только создается частица (любого вида), ее взаимодействия с Сеткой могут изменить ее «рукость». В электрослабой стандартной модели взаимодействия частиц с конденсатом Хиггса делают именно это.

Мы можем провести строгое (то есть буст-инвариантное) различие между «леворукими» и «праворукими» *безмассовыми* частицами или использовать квантовые поля. Тот факт, что наши успешные уравнения для слабых взаимодействий опираются на это различие, показывает, что Природа предпочитает безмассовые частицы и квантовые поля в качестве первичных материалов.

С. 230. «Джейн Эллен Харрисон» (The Ker as siren, Prolegomenma to the Study of Greek Religion (3rd ed. 1922:197–207, p. 197). Этот фрагмент присутствует здесь, поскольку я собирался использовать на обложке книги репродукцию картины «Сирена» Джона Уильяма Уотерхауса. Увы, этого не случилось. Однако вы можете посмотреть изображение на сайте itsfrombits.com.

---

* Такие изменения принято называть спиральностью; еще не совсем хиральность, но ее предтеча. — *Примеч. науч. ред.*

Глава 18

Говард Георги, Хелен Куинн и Стивен Вайнберг первыми рассчитали поведение трех сил на малых расстояниях, чтобы посмотреть, можно ли их объединить. (Разумеется, для сильного взаимодействия это всего лишь расчет Гросса — Политцера — Вильчека.)

С. 232. «Меры их относительной мощности»: заметим, что на фундаментальном уровне, в терминах чисел, на которые умножаются узлы в диаграммах Фейнмана, слабая связь на самом деле больше, чем электромагнитная (для специалистов: здесь имеется в виду гиперзаряд). Тем не менее сверхпроводимость Сетки делает слабую силу короткодействующей, поэтому на практике она оказывает гораздо меньшие эффекты.

С. 232. «Намного меньше атомов»: контраст между размерами атомов и ядер лишь отчасти связан с относительной слабостью электромагнитных сил. Важным фактором также является малое значение массы электрона по сравнению с массой протонов и нейтронов.

Мы можем понять почему, если вспомним логику пункта 3 схолии из главы 9. Размер атомов определяется компромиссом между обнулением электрических полей путем помещения электронов прямо поверх протонов и учетом волновой природы электронов. Чем меньше масса частицы, тем больше ее волновая функция стремится распространиться, и поэтому малая масса электрона смещает компромисс в сторону больших размеров.

Глава 19

Более подробно о Поппере и его философии можно почитать в книге The Philosophy of Karl Popper (2 vols.) (ed. P. Schilpp (Open Court)).

Глава 20

Влияние суперсимметрии на эволюцию связей было впервые рассмотрено Савасом Димопулосом, Стюартом Раби и мной. Личное воспоминание приведено в приложении B.

С. 241. Подробнее о частицах Хиггса вы можете узнать в популярных книгах Оэртера и Клоуза, о которых упоминалось выше, более

техническое описание можно найти в книгах Пескина, Шредера и Средники.

С. 242. Книга Supersymmetry: Unveiling the Ultimate Laws of Nature (Gordon Kane (Perseus)) представляет собой популярную работу, написанную выдающимся исследователем.

С. 242. «Их объединения»: суперсимметрия напрямую не связывает различные части Центральной теории. Ни одна из известных в настоящее время частиц не имеет подходящих свойств для того, чтобы считаться суперсимметричным партнером для любой другой. Все объединить мы сможем, только одновременно учитывая объединение зарядов и суперсимметрию.

С. 243. «Не намного тяжелее»: суперсимметрия должна быть нарушена, однако в отношении того, как это происходит, существует еще больше неопределенности, чем в отношении вопросов космической сверхпроводимости, обсуждавшихся в главе 8 и приложении Б. Однако нарушение суперсимметрии происходит, и конечным результатом должно быть то, что известные нам партнеры частиц являются значительно более тяжелыми. Если они слишком тяжелые, они не внесут достаточный вклад в колебания Сетки и мы вернемся к состоянию «на грани промаха», описанному в главе 18.

Существуют и другие, независимые причины заподозрить, что суперсимметричные партнеры не являются слишком тяжелыми. Наиболее важной из них является следующая.

Если вы вычислите, какой эффект оказывают виртуальные частицы на массу частицы Хиггса в единой теории, вы обнаружите, что они имеют тенденцию подтягивать эту массу до масштабов объединения. В этом заключается суть того, что часто называют проблемой иерархии. Вы можете обнулить эти эффекты одним росчерком пера, задав достаточное значение начальной массы для практически полного обнуления вклада виртуальных частиц, однако большинство физиков находят такую «тонкую настройку» возмутительной — они называют ее *неестественной*. С суперсимметрией эти поправки отменяются, и такой тонкой настройки не требуется. Однако если суперсимметрия сильно нарушена, то есть если партнеры являются слишком тяжелыми, у нас снова возникают проблемы.

С. 244. «Корректировки этих искажений»: в данный расчет я включаю только эффекты частиц, необходимые для реализации суперсимметрии (для экспертов: я имею дело с минимальной суперсимметричной стандартной моделью, или МССМ). Дополнительные (гораздо более тяжелые) частицы, необходимые для создания исчерпывающей единой теории, не были сюда включены. Именно поэтому связи, объединившись при высоких энергиях, снова распадаются. В полной теории, однажды объединившись, они останутся вместе. Однако поскольку мы не знаем достаточно для того, чтобы определить соответствующие детали полной теории, я решил рассматривать вещи по мере их поступления.

С. 246. «Довольно близко»: поскольку у нас нет надежной теории, объясняющей, как гравитация ведет себя на коротких расстояниях, я коснулся этого вопроса лишь вскользь.

Глава 21

Дополнительную информацию и последние новости о проекте БАК вы можете получить на сайте ЦЕРН public.web.cern.ch/Public/Welcome.html. Perspectives on LHC Physics (edited by G. Kane, World Scientific) — сборник статей ведущих экспертов. Я также рекомендую свою научную работу Anticipating a New Golden Age. Вы можете найти ее на сайте itsfrombits.com.

С. 252. Книга Quintessence (Lawrence Krauss, Perseus) представляет собой хорошее популярное изложение темы темной материи, темной энергии и современной космологии в целом.

С. 255. «Протоны должны распадаться»: сила и слабость нашего расчета, показывающего, что (низкоэнергетическая) суперсимметрия обеспечивает точное объединение сил, заключается в его нечувствительности к деталям. Вклад новой частицы в виде экранирования (или антиэкранирования) вступает в игру только при энергиях, превышающих энергию покоя частицы mc^2. Поскольку изменения, имеющие решающее значение для объединения, накапливаются в пределах огромного диапазона энергий, не имеет большого значения, где имен-

но они начинаются, и поэтому масса частицы незначительно влияет на ее вклад. Таким образом, на результат нашего расчета объединения не сильно повлияло бы, скажем удвоение или уменьшение вдвое массы новых суперсимметричных частиц. Результат незыблем, его нелегко пошатнуть.

С. 256. «Каких новых эффектов следует ожидать»: теория струн вдохновила ученых на предположения о существовании дополнительных пространственных измерений. Дополнительные измерения должны быть либо очень маленькими (свернутыми), либо сильно искривленными и трудными для проникновения, иначе мы бы их заметили. Однако, возможно, более пристальное исследование с помощью ускорителя БАК позволит их обнаружить. Популярное изложение этих идей можно найти в книгах Hiding in the Mirror (Lawrence Krauss, Viking) и «Закрученные пассажи» (Лиза Рэндалл (издательства «Едиториал УРСС», «Либроком», 2011)).

Эпилог

С. 260. «Далеко от объяснения»: согласно идеям, описанным в приложении Б, конденсат Хиггса непосредственно ответственен за массу *W*- и *Z*-бозонов благодаря космической сверхпроводимости. Итак, если эти идеи верны, то, выяснив природу конденсата Хиггса, мы поймем происхождение масс этих конкретных частиц.

Приложение Б

С. 273. «Легко генерировать»: вы можете проверить это, испуская бозон, который уносит единицу красного заряда и вносит единицу фиолетового заряда (то есть уносит отрицательную единицу фиолетового заряда); *u*-кварк в верхней строке превратится в антиэлектрон e^c в 15-й строке. (Помните, что символы + и – соответствуют зарядам, величина которых равна половине единицы.) Поглощая один и тот же бозон, *d*-кварк в пятой строке превратится в анти-*u*-кварк в девятой строке. На кредитном счете эти ребята связываются путем обмена символами + и – между первым и последним столбцами. Таким образом,

излучая и поглощая этот специфический изменяющий цвет бозон как виртуальную частицу, мы получаем процесс:

$$u + d \to u^c + e^c.$$

Теперь мы добавим в обе стороны наблюдателя u-кварк: $u + u + d \to u + u^c + e^c$ — и окажемся почти у цели. Нам просто нужно признать, что $u + u + d$ — это составляющие протона и что $u + u^c$ может аннигилировать в фотон. Наконец, мы получаем процесс распада протона:

$$p \to \gamma + e^c,$$

как и было обещано.

Благодарности

Эта книга написана в основном по материалу открытых лекций «Вселенная — диковинное место», «Цифровой чертеж мира», «Происхождение массы и слабость гравитации» и «Живучесть эфира», которые я в последние годы читал во многих учреждениях. Благодарю организаторов этих лекций за предоставленную возможность выступить, а также моих слушателей за множество интересных вопросов и полезных откликов.

Благодарю за неизменную поддержку Массачусетский технологический институт; Нордиту — за гостеприимство, пользуясь которым я успел написать большую часть текста, а также Оксфордский университет, где я заканчивал книгу. Хотелось бы поблагодарить Бетси Девайн и Эла Шапиро за внимательную вычитку рукописи и многочисленные ценные замечания. Также хочу сказать спасибо Кэрол Брин за комментарии к рукописи и в особенности за помощь с набросками главы 6. Благодарю Джона Брокмана и Катинку Мэтсон за то, что уговорили меня написать эту книгу, а также Билла Фрухта, Сандру Берис и коллектив издательства Perseus за огромную помощь и поддержку. Еще раз спасибо Бетси за поддержку и вдохновение, благодаря которым я все-таки закончил эту книгу.

Фрэнк Вильчек

Тонкая физика. Масса, эфир и объединение всемирных сил

Перевел с английского *С. Черников*

Заведующая редакцией	*Ю. Сергиенко*
Руководитель проекта	*О. Сивченко*
Ведущий редактор	*Н. Гринчик*
Научный редактор	*К. Циберкин*
Литературный редактор	*Е. Рафалюк-Бузовская*
Художественный редактор	*С. Заматевская*
Корректоры	*О. Андриевич, Е. Павлович*
Верстка	*Г. Блинов*

Изготовлено в России. Изготовитель: ООО «Питер Пресс».
Место нахождения и фактический адрес: 192102, Россия, город Санкт-Петербург,
улица Андреевская, дом 3, литер А, помещение 7Н. Тел.: +78127037373.

Дата изготовления: 09.2017. Наименование: книжная продукция. Срок годности: не ограничен.

Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 034-2014, 58.11.12 —
Книги печатные профессиональные, технические и научные.

Подписано в печать 15.09.17. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Усл. п. л. 21,000.
Тираж 3000. Заказ 0000.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала АО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, Казань, ул. Декабристов, 2. E-mail: idelpress@mail.ru